



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

## **Generación de un modelo de optimización de ciclos semafóricos en intersecciones semaforizadas**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Civil

Autores:

Raúl Alberto Alvarez Unda

CI: 0105743744

Correo electrónico: raul2696@hotmail.com

Juan José Picón Mosquera

CI: 0105818850

Correo electrónico: juanjosepicon96@gmail.com

Director:

Ing. Juan Marcelo Avilés Ordoñez MSc.

CI: 0103872503

**Cuenca, Ecuador**

18-febrero-2021

**Resumen:**

La necesidad de movilidad en las urbes ha generado un aumento de vehículos del parque automotor. Esto implica mayor volumen vehicular y, por lo tanto, un aumento en el congestionamiento del sistema vial ya existente. De este sistema, la infraestructura que presenta mayor conflicto son las intersecciones semaforizadas, en donde encontramos un alto volumen vehicular, demoras y congestionamientos.

Debido a la problemática de realizar un correcto análisis para obtener las fases y ciclos semafóricos en intersecciones de este tipo, en el presente trabajo de titulación se genera un modelo que determina las demoras y el nivel de servicio del estado actual de una intersección y optimiza la misma. De esta manera se entrega como resultado el nuevo nivel de servicio, demoras, fases y ciclos semafóricos óptimos para la intersección de análisis.

Para realizar el modelo planteado se implementa el lenguaje de programación Visual Basic, y la metodología de estimación rápida para intersecciones semaforizadas, establecida por el libro Highway Capacity Manual 2010. Además, utilizando el mismo lenguaje de programación y basándose en la metodología de análisis peatonal en intersecciones discontinuas, presentada en el libro mencionado, se implementa adicionalmente un modelo de cálculo del nivel de servicio peatonal.

A este modelo generado, se lo prueba en 16 intersección de la ciudad de Cuenca - Ecuador, con información pertinente a aforos del año 2014. Obteniendo como resultado la calibración de los semáforos para las distintas intersecciones. Posteriormente, para obtener una validación de los resultados obtenidos, se realiza un análisis de microsimulación en cada una de las intersecciones utilizando el software Tritone.

De los resultados obtenidos mediante el modelo de optimización semafórica generado y la validación mediante el software Tritone, se concluye que las 16 intersecciones pueden ser optimizadas. De las cuales 6 mejoran su nivel de servicio, mientras que las 10 restantes mantienen su nivel de servicio con una disminución en el tiempo de demora.

**Palabras claves:**

HCM 2010. Intersección semaforizada. Método de estimación rápida. Microsimulación. Nivel de servicio. Optimización. Tritone.

**Abstract:**

The need for mobility in cities has generated an increase in vehicles. This implies greater vehicle volume and, therefore, an increase in the congestion of the existing road system. The infrastructure that presents the greatest conflict are the signalized intersections, where we find a high volume of vehicles, delays and congestion.

Due to the problem of carrying out a correct analysis to obtain the phases and traffic light cycles at intersections of this type, in this degree work is generated a model that determines the level of service and delays of the current state of an intersection and optimizes it. In this way, the model generates as a result a new level of service, delays, phases and optimal traffic light cycles for the analysis intersection.

To carry out the proposed model, it is implemented using the Visual Basic programming language, the methodology of quickly estimation for signalized intersections, established by the book Highway Capacity Manual 2010. In addition, using the same programming language and based on the methodology of pedestrian analysis in discontinuous intersections, presented in the aforementioned book, a pedestrian service level calculation model is implemented.

This generated model is tested at 16 intersections in the city of Cuenca - Ecuador, with information sampled in 2014. Obtaining the calibration of the traffic lights for the different intersections as a result. Subsequently, to obtain a validation of the results obtained, a microsimulation analysis is carried out in each of the intersections, for this the Tritone software is used.

From the results obtained by means of the traffic light optimization model generated and the validation by Tritone software, it is concluded that the 16 intersections can be optimized. Of which 6 improve their level of service, while the remaining 10 maintain their level of service with a decrease in the delay time.

**Keywords:**

HCM 2010. Level of service. Microsimulation. Optimization. Quick estimation method. Traffic light intersection. Tritone.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN .....	14
1.1 Antecedentes.....	14
1.2 Definición del problema .....	15
1.3 Justificación .....	16
1.4 Objetivo general .....	16
1.5 Objetivos específicos.....	16
1.6 Hipótesis.....	17
1.7 Alcance.....	17
2 MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Aforos vehiculares .....	18
2.2 Demanda y capacidad .....	18
2.2.1 Volumen o demanda de tránsito.....	19
2.2.2 Capacidad.....	19
2.2.3 Relación volumen – capacidad.....	19
2.3 Semaforización .....	20
2.3.1 Semáforos de tiempo fijo.....	21
2.3.2 Componentes de un ciclo semafórico.....	22
2.4 Tipos de carriles .....	23
2.4.1 Carriles compartidos .....	24
2.4.2 Carriles exclusivos .....	24
2.4.3 Carriles sin oposición .....	24
2.4.4 Grupo de movimiento.....	24
2.4.5 Grupo de carriles.....	24
2.5 Intersecciones señalizadas con semáforos.....	25
2.5.1 Datos levantados en campo .....	26



2.5.2 Tipos de giros izquierdos .....	26
2.5.3 Consideraciones para giros a la izquierda.....	27
2.5.4 Nivel de servicio vehicular.....	28
2.5.5 Nivel de servicio peatonal según HCM 2010 .....	30
2.6 Microsimulación .....	32
2.6.1 Alcance .....	33
2.6.2 Software a utilizar.....	34
3 METODOLOGÍA .....	35
3.1 Desarrollo de modelo de optimización mediante el software Microsoft Excel.....	36
3.1.1 Hipótesis del modelo.....	36
3.1.2 Procesos del modelo.....	36
3.1.3 Alimentación del modelo .....	36
3.1.4 Limitaciones del modelo.....	37
3.1.5 Ventajas y desventajas del modelo de optimización.....	38
3.2 Estado actual.....	38
3.2.1 Ingreso de datos .....	38
3.2.2 Estado actual demoras y nivel de servicio vehicular.....	48
3.2.3 Estado actual demoras y nivel de servicio peatonal .....	56
3.3 Estado optimizado .....	65
3.3.1 Estado optimizado demoras y nivel de servicio .....	65
3.4 Algoritmo .....	67
3.5 Validación del modelo de optimización, utilizando software Tritone .....	70
4 CÁLCULOS.....	73
4.1 Determinación de una muestra significativa de intersecciones .....	73
4.2 Implementación de modelo de optimización semafórico .....	74
4.2.1 Intersección modelo .....	74



4.2.2 Ingreso de datos de estado actual .....	75
4.2.3 Cálculos de estado actual .....	78
4.2.4 Ingreso de datos estado optimizado.....	82
4.2.5 Cálculos estado optimizado .....	83
4.3 Validación de modelo elaborado mediante microsimulación por Tritone .....	86
5 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	87
5.1 Elaboración de modelo de cálculo para obtener demoras y nivel de servicio de intersecciones semaforizadas.....	87
5.1.1 Resultado y validación de demoras y nivel de servicio en estado ACTUAL.....	87
5.1.2 Resultado y validación de demoras y nivel de servicio en estado OPTIMIZADO	90
5.2 Validación global del modelo de optimización.....	93
5.3 Análisis de optimización.....	96
5.4 Caracterización peatonal de intersecciones.....	98
5.5 Análisis de beneficio por la utilización del modelo de optimización .....	99
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
6.1 Conclusiones .....	101
6.2 Recomendaciones .....	102



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Raúl Alberto Alvarez Unda en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Generación de un modelo de optimización de ciclos semafóricos en intersecciones semaforizadas", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Ecuador

18 de febrero de 2021



---

Raúl Alberto Alvarez Unda

C.I: 0105743744



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Juan José Picón Mosquera en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Generación de un modelo de optimización de ciclos semafóricos en intersecciones semaforizadas", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Ecuador

18 de febrero de 2021

Juan José Picón Mosquera

C.I: 0105818850



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Raúl Alberto Alvarez Unda, autor/a del trabajo de titulación "Generación de un modelo de optimización de ciclos semafóricos en intersecciones semaforizadas", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, Ecuador

18 de febrero de 2021



Raúl Alberto Alvarez Unda

C.I: 0105743744



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Juan José Picón Mosquera, autor/a del trabajo de titulación "Generación de un modelo de optimización de ciclos semafóricos en intersecciones semaforizadas", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, Ecuador

18 de febrero de 2021

---

Juan José Picón Mosquera

C.I: 0105818850



## **AGRADECIMIENTO**

Entre tanta gente que agradecer, primero están mis padres, Carlos y Rossana, trabajadores e ingeniosos, les agradezco con todo mi corazón la enseñanza y apoyo que me han brindado. Sin lugar a dudas, debo agradecer a quienes constantemente admiré, por su creatividad y pasión, a mis hermanos, Carlos y Natalia, gracias por todo lo que he aprendido de ustedes.

A todas aquellas personas que siempre creyeron en mí. A esas personas que me apoyaron y me dieron fuerzas en los días buenos y en los días malos. A mis amigos. Les agradezco por todo.

A quien nos apoyó en este proceso con todo su conocimiento. Gracias Ing. Juan Avilés, fue un pilar fundamental para realizar este trabajo de titulación.

**Raúl Alberto Alvarez Unda**



## **AGRADECIMIENTO**

De manera sincera agradezco a mi madre Dolorosa, pues en su manto me ha protegido y guiado durante los últimos años, recordándome siempre en cada acto el “ser más para servir mejor”.

Por todo lo vivido durante el tiempo universitario y de manera especial durante la realización de este trabajo de titulación, agradezco al Ing. Juan Avilés, ya que además de ser un gran profesional y educador, se ha convertido en un amigo. El mismo que con toda su experiencia y honestidad, nos ha sabido guiar, motivar, e impulsar a ser mejores y realizar verdaderos cambios para el desarrollo de nuestra ciudad y país.

Agradezco a mis padres: Patricio y Raquel, a mis hermanos: Christian y Paula, abuelos, tíos y primos por el amor recibido, la dedicación y la paciencia que siempre me han brindado. Siendo mi familia el impulso necesario para proponerme cualquier meta en mi vida y más importante llegar a cumplirlas. Las palabras siempre escasean para agradecerles, pues la única manera de lograrlo es mejorar constantemente, y así será.

**Juan José Picón Mosquera**



## **DEDICATORIA**

A dos personas quiero dedicar este trabajo. La primera, mi abuelo, Carlos, quien me inspiró a seguir una carrera tan bonita como la ingeniería civil, quien con sus historias me demostró que ser ingeniero es más que un título.

A mi prima, mi pequeña, mi enana, a ti te dedico este trabajo y todo el tiempo que ha pasado hasta llegar a esta meta.

**Raúl Alberto Alvarez Unda**



## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación a mis padres: Patricio y Raquel por apoyarme y guiarme en todo momento. Sus consejos siempre serán tomados en consideración, debido a que su único deseo es que siempre mejore como persona.

De igual manera dedico este trabajo a mis compañeros, amigos y hermanos de aula, con quienes durante estos años hemos: aprendido, mejorado y disfrutado de la vida universidad. Creando entre nosotros una gran y sincera amistad. Confiado de que seguiremos apoyándonos como siempre, pero ahora desde un punto de vista profesional. Está en nosotros construir un mejor país.

**Juan José Picón Mosquera**

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se expone la situación actual de los sistemas viales desde un punto global, haciendo énfasis en estructuras de intersecciones semaforizadas de la ciudad de Cuenca, Ecuador. Además, se presenta la justificación del presente trabajo de titulación, junto con los objetivos, hipótesis y alcance del mismo.

Uno de los pilares para el desarrollo de la sociedad es la posibilidad del desplazamiento que existe en la misma. Debido al fuerte desarrollo tecnológico se ha facilitado la movilidad en medios aéreos, marítimos y terrestres, siendo la adquisición del vehículo privado uno de los más beneficiados. Junto a este último el aumento de la población en las ciudades ha conllevado a un crecimiento del parque automotor. Sin embargo, en las actuales urbes encontramos problemas como los congestionamientos vehiculares a lo largo de todo el sistema vial, en donde las intersecciones semaforizadas son los sectores de mayor congestionamiento (Sanchez & Villa G, 2012). Por tal motivo, en el presente trabajo de titulación se realiza un modelo general que califique el nivel de servicio según (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) y optimice sus ciclos semafóricos.

#### 1.1 Antecedentes

En Ecuador en los años 2017 y 2018 existió un crecimiento del 7.4 % de vehículos matriculados, con un total de 2,403,651 vehículos para el inicio del año 2019 (INEC, 2019). Específicamente en la ciudad de Cuenca, según (LlactaLAB, 2018) el parque automotor crece cuatro veces más rápido que la población cuencana y en horas pico la ciudad llega a contar con hasta 50,000 vehículos por hora en las intersecciones más transitadas. Además, en Cuenca se evidencian problemas de movilidad como: ineficiencia en el transporte público y semaforización, agravado por calles angostas en el centro de la ciudad y geometrías deficientes, se debe además mencionar que la dinámica de movilidad de los ciudadanos favorece al congestionamiento en horas pico (Mejía Zumba & Morocho Siguenza, 2016).

A nivel global, encontramos problemas de congestionamiento en intersecciones semaforizadas. Investigaciones realizadas muestran que si se utiliza un ciclo semafórico correcto se logran disminuir las demoras de vehículos. En el estudio realizado por (Samuel, 1996) quien utilizó 512 detectores de vehículos, y cuyos resultados se utilizaron para determinar el funcionamiento de las señales semafóricas en 200 intersecciones, obteniendo

resultados favorables para disminuir el tiempo de cada viaje. Además, (Ribera S & Velásquez O, 2019), (Alba M & Hernández M, 2013), (Gutierrez Z., 2019), quienes mejoran el flujo vehicular en intersecciones semaforicas calibrando los ciclos semaforicos o estudiando dichos ciclos. Todas las investigaciones antes mencionadas utilizan software o herramientas que facilitan al ingeniero de tránsito mejorar el flujo vehicular. Actualmente, existen diversos programas de optimización de ciclos semaforicos, macrosimulación o microsimulación, aforos vehiculares, etc. Pese a ser útiles estos llegan a tener un costo considerable para su utilización.

A nivel colectivo las investigaciones demuestran que una calibración adecuada en los ciclos semaforicos y sus respectivas longitudes de ciclos impactan de manera beneficiosa al flujo vehicular, reduciendo el tiempo de espera y el largo de las filas. Adicionalmente, software como Synchro con un alto costo, otorga la posibilidad de conocer el nivel de servicio y de optimizar los ciclos semaforicos (Cubic, 2019)

En Cúcuta Colombia, se emuló una intersección en donde un algoritmo de control adaptativo y una base de datos que depura el rendimiento del controlador, afirma que la manipulación de los tiempos de encendido de las luces semaforicas aumenta el flujo vehicular hasta en un 5.5%, reduciendo el largo de fila hasta un 18% (Celis P, y otros, 2016).

## **1.2 Definición del problema**

Los congestionamientos vehiculares aumentan los tiempos de recorrido, baja el nivel de servicio, incrementa los niveles de contaminación, entre otros problemas. Además, todos los factores que crean congestionamiento en el sistema vial agravan el problema en intersecciones semaforizadas si cuentan en ella con una mala calibración semaforica.

Por otro lado, y a pesar de que el flujo vehicular varía a lo largo del día la intersección puede contar con una configuración semaforica funcional para ciertas horas, sin embargo, este no llega a ser el óptimo para todos los flujos, causando de que en ciertos momentos del día el semáforo genere más problemas.

La ciudad de Cuenca, Ecuador presenta congestionamiento en su sistema vial, el mismo que se ve agravado en las intersecciones semaforizadas debido a malas calibraciones de los semáforos, manejo blando de los conductores, entre otros.

Por la diversidad de acciones o problemas con los que se encuentran en una intersección semaforizada, estas deben ser analizadas de la mejor manera y periódicamente,



convirtiendo la calibración de los semáforos en un proceso iterativo y cansado para el ingeniero de tránsito.

Por tal motivo, se ha convertido en práctica habitual intentar mejorar el flujo vehicular de la intersección alterando su diseño geométrico, aumentando señalización, permitiendo o prohibiendo giros hacia la izquierda, entre otros. Sin embargo, estas opciones deben ser consideradas siempre y cuando una mejora en la calibración del ciclo semafórico llegue a ser nula.

### **1.3 Justificación**

Como se ha observado el congestionamiento en intersecciones semaforicas son particulares de cada una de ellas, así pues, la misma debe volver a ser analizada debido a la variabilidad de flujo que existe en el sistema vial. En consecuencia, la calibración de ciclos semafóricos llega a ser una solución útil, rápida y de bajo costo si hablamos de la intervención de una sola intersección. Sin embargo, la búsqueda del ciclo semafórico óptimo para diferentes intersecciones se vuelve iterativo para los ingenieros de tránsito. Por tal motivo, la realización de un modelo general que califique el nivel de servicio y mejore el mismo optimizando su ciclo semafórico llega a ser pertinente.

### **1.4 Objetivo general**

Elaborar un modelo para la optimización de los tiempos de demoras vehiculares en intersecciones semaforizadas, modificando únicamente las fases y ciclos semafóricos.

### **1.5 Objetivos específicos**

Seleccionar una muestra representativa de intersecciones semaforizadas de una base de datos de 81 intersecciones.

Elaborar un modelo para obtención del nivel de servicio y demoras vehiculares existentes en las intersecciones semaforizadas.

Adicionar al modelo generado anteriormente un proceso para obtener una optimización del ciclo semafórico de la intersección, con el fin de disminuir las demoras vehiculares.

Verificar la optimización de los tiempos de demora existentes en la intersección mediante un análisis de microsimulación a la intersección actual y optimizada.

Realizar un análisis entre el nivel de servicio de las intersecciones analizadas comparando su estado actual y optimizado.

Generar un modelo de cálculo que caracterice el espacio de circulación del peatón y su nivel de servicio en intersecciones semaforizadas.

## **1.6 Hipótesis**

En el presente trabajo de titulación se espera generar un modelo de optimización de intersecciones semaforizadas, de modo que este pueda ser utilizado para cualquier intersección semaforizada de tres o cuatro ramales, siempre que se cuente con información geométrica, flujos vehiculares y peatonales de la zona de estudio. Además, se espera plantear diferentes mejoras para las intersecciones a ser estudiadas en el presente trabajo de titulación.

## **1.7 Alcance**

El modelo de optimización elaborado funciona bajo dos metodologías. La primera correspondiente al método de estimación rápida (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010), mientras que la segunda presente en el mismo documento caracteriza el nivel de servicio del peatón.

Dicho modelo puede optimizar sus ciclos y fases semafóricos de una intersección. Para la optimización se verifica el menor tiempo de demora de la intersección, dicho proceso se realiza dependiendo la complejidad de la intersección y el intervalo de ciclo de análisis, verificando todas las opciones posibles en dicho intervalo. Para ello se realiza un máximo de 234 330 767 iteraciones en ciclos semafóricos con 6 fases.

Se optimiza el tiempo de demora de 16 intersecciones de la ciudad de Cuenca, Ecuador. Se analizan los estados actual y optimizado de cada intersección, obteniendo un total de 32 procesos donde se utiliza el modelo elaborado.

Para la revisión de los resultados obtenidos por del modelo de optimización semafórico, en las distintas intersecciones, se usa un software de microsimulación. Dicho programa utilizado, es el software italiano Tritone, con el cual se analizaron las 16 intersecciones en el estado actual y optimizado obteniendo un total de 32 usos del programa.

## CAPÍTULO 2

### 2 MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se expresa toda la teoría recopilada, acerca de intersecciones semaforizadas, dicha teoría es utilizada para la elaboración del modelo de optimización de demoras vehiculares en dichas intersecciones semaforizadas. Además, se expone la base teórica de microsimulación utilizada por el software Tritone.

#### 2.1 Aforos vehiculares

En las ciudades cada vez se encuentra un mayor incremento de actividades, lo que recae en un aumento de la demanda del sistema vial. En este incremento vehicular encontramos transporte de personas en autos privados o transporte público, transporte de productos para zonas comerciales o zonas industriales. Por lo tanto, es importante conocer la información actual de la red vial, para llegar a conocer estos datos se realizan estudios volumétricos, en los cuales encontramos los aforos vehiculares.

“Los estudios sobre volúmenes vehiculares y peatonales tienen la finalidad de levantar datos relacionados con los movimientos vehiculares y/o peatonales, dentro de puntos o secciones específicas del sistema vial” (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972). Estos datos son expresados en relación del tiempo y hacen posible la estimación de la calidad y nivel de servicio brindado en el sistema.

(Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) exhibe diferentes formas de realizar estos aforos, tales como; aforos manuales, útiles para conocer el volumen de los movimientos direccionales en intersecciones, los volúmenes por carriles individuales y composición vehicular. Aforos que combinan métodos manuales y mecánicos, tales como el uso de contadores mecánicos. Aforos con el uso de dispositivos mecánicos, contabilizando el número de ejes de los vehículos que utilizan la vía o dispositivos digitales.

#### 2.2 Demanda y capacidad

Es necesario conocer datos relacionados con el movimiento de los vehículos o personas en las intersecciones (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972), por ello se debe conocer la demanda y capacidad de estas intersecciones.

### 2.2.1 Volumen o demanda de tránsito

El volumen de tránsito es la cantidad de vehículos o personas que transitan por una zona específica del sistema vial, utilizando un carril o grupo de carriles durante un determinado periodo de tiempo. (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) expresa el volumen de tránsito según la ecuación ( 1 ).

$$Q = \frac{N}{T} \quad ( 1 )$$

Donde:

$Q$  = vehículos que transitan por unidad de tiempo (vehículos/periodo)

$N$  = número total de vehículos que transitan (vehículos)

$T$  = periodo determinado (unidades de tiempo)

Los volúmenes de tránsito son considerados como dinámicos, ya que los datos aforados pertenecen a un periodo determinado de tiempo. Sin embargo, gracias al comportamiento rítmico y repetitivo de los usuarios se utiliza dichos datos como válidos y seguros debido a que la toma de datos de mayor validez se da en el periodo de tiempo de mayor volumen vehicular. (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) recomienda que se debe considerar el volumen vehicular de los carriles o grupos de carriles para la operación de calles y carreteras.

### 2.2.2 Capacidad

Según (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) la capacidad es una medida en donde se verifica la eficiencia de una carretera, ya que esta suministra un servicio a la demanda vial que existe. Dicho de otra manera, es la capacidad u oferta que otorga una vía a un determinado sector del sistema vial, la capacidad de una infraestructura vial es el número máximo de vehículos o peatones que pueden utilizar la vía o carretera durante un tiempo determinado.

En los análisis de capacidad se utiliza un periodo de 15 minutos, puesto que se considera que es el tiempo de menor duración en donde se llega a exponer un flujo estable (Special Report 209, 1985).

### 2.2.3 Relación volumen – capacidad

Una porción del sistema vial cuenta con un funcionamiento óptimo, si en este circula un número considerable de vehículos, a una velocidad razonable, en donde no se observa congestionamiento. Para que esto suceda la cantidad de vehículos que circulan en dicho

momento deberá ser menor a la capacidad de la vía en cuestión (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

Existen casos en donde el sistema vial presenta inconvenientes a pesar de que el valor de volumen sea inferior al de capacidad; si el valor de volumen es inferior pero cercano al de la capacidad de la vía, se considera que existe un flujo problemático. Por otro lado, si en la vía transitan vehículos a bajas densidades, puede causar un aumento en la densidad venidera, provocando así condiciones de flujo forzado que a su vez concluyen en niveles bajos de operación.

La relación de volumen – capacidad es utilizada para conocer los niveles de servicio de las vías, por ello, (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) presenta los siguientes valores:

- Si la relación es menor a 1 ( $V/C < 1$ ), el sistema vial no está colapsado.
- Si la relación es igual a 1 ( $V/C = 1$ ), el sistema vial está al límite.
- Si la relación es mayor a 1 ( $V/C > 1$ ), el sistema vial está saturado.

### 2.3 Semaforización

Debido al complejo sistema vial de las urbes, los flujos son interrumpidos si en ellos se interceptan vías, avenidas o cruces peatonales que necesariamente deben atravesar caminos, generando de esta manera un flujo discontinuo, producto de interrupciones periódicas del flujo vehicular o peatonal. Es necesario distribuir los movimientos pertinentes a cada vía de una manera óptima, para ello el principal dispositivo de regulación es el semáforo (Garber & Hoel, 2009).

Para conceder un movimiento u otro, el semáforo hace el uso de tres colores; rojo, ámbar y verde, los cuales indican: detención de los conductores antes de la línea de parada; indica a los conductores que la luz roja se va a encender y que el flujo vehicular debe detenerse; e indica a los conductores que pueden seguir transitando, respectivamente (Roess, Prassas, & McShane, 2011)

El sistema semafórico es operado por una unidad de control. En donde, también se cuenta con señales de giro en el caso de ser necesarias, estas deberán contener flechas direccionales que apuntarán hacia el sentido en donde se permitirá el movimiento. (Roess, Prassas, & McShane, 2011)

(Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) recomienda que en urbes donde el tránsito vehicular sea considerable, se debe utilizar sistemas avanzados de semáforos, añadiendo una

coordinación computarizada e integrar detectores de vehículos, puesto que el flujo vehicular siempre cambia de forma dinámica y continua en el tiempo, provocando variaciones en el flujo y sus respectivas demoras vehiculares.

Es aconsejable que cuando el semáforo entre en funcionamiento, verificar si el mismo funciona de manera adecuada y si responde a las necesidades reales de la intersección. (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) aconseja que, para hacer uso de un semáforo, se deben analizar las ventajas y desventajas de usar el mismo.

### 2.3.1 Semáforos de tiempo fijo

Los semáforos de tiempos fijos se utilizan en sistemas viales donde el patrón de tránsito es parcialmente estable. O donde las variaciones del volumen pueden adaptarse a un ciclo semafórico, sin ocasionar demoras excesivas o congestionamientos. Así mismo, su uso es favorable para sincronizar intersecciones cercanas (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972).

Para instalar los semáforos de tiempo fijo (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) recomienda:

- Contar con un número mínimo de vehículos: cuando en cualquier hora del día la intersección presente los volúmenes indicados en la Tabla 1.

Número de carriles de circulación por acceso		Vehículos por hora en la calle principal (total en ambos accesos)		Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (un solo sentido)	
Calle principal	Calle secundaria	Urbano	Rural	Urbano	Rural
1	1	500	350	150	105
2 o más	1	600	420	150	105
2 o más	2 o más	600	420	200	140
1	2 o más	500	350	200	140

*Tabla 1 Volumen mínimo de vehículos (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972)*

- Cuando la interrupción del tráfico sea continua: la operación de la calle principal es tal que la calle secundaria sufre alguna de las demoras presentadas en la Tabla 2:

Número de carriles de circulación por acceso		Vehículos por hora en la calle principal (total en ambos accesos)		Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (un solo sentido)	
Calle principal	Calle secundaria	Urbano	Rural	Urbano	Rural
1	1	750	525	75	53
2 o más	1	900	630	75	53
2 o más	2 o más	900	630	100	70
1	2 o más	750	525	100	70

*Tabla 2 Volumen mínimo de vehículos (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972)*

- Cuando exista un volumen mínimo de peatones.
- Al contar con una intersección en donde la circulación sea progresiva.
- Exista antecedentes acerca de accidentes en dicha intersección, por ende, la necesidad de un semáforo sea indispensable

### 2.3.2 Componentes de un ciclo semafórico

El funcionamiento de los semáforos viene dado por intervalos de tiempo, en donde se permite un movimiento, se advierte un cambio de movimiento y se prohíben movimientos. Todas estas acciones se realizan de forma secuencial llegando así a formar todo un ciclo semafórico. (Roess, Prassas, & McShane, 2011), describe los siguientes componentes:

#### Ciclo semafórico

Llega a ser una rotación completa de las acciones del semáforo, en donde al culminar un ciclo se habrán permitido todos los movimientos de la intersección. Cada movimiento vehicular recibe un tiempo de verde durante cada ciclo.

#### Longitud de ciclo

Es el tiempo en segundos que toma completar una rotación del ciclo semafórico, es decir, el tiempo que toma completar todas las fases permitidas una sola vez.

#### Intervalo de tiempos

Es un intervalo de tiempo dentro del ciclo semafórico, en donde la señal semafórica no cambia. Existen diferentes tipos de intervalos en un ciclo semafórico, siendo estos:

- **Intervalo de cambio**

Se representa con el color ámbar, este se encuentra entre la transición que existe del verde hacia el rojo. Este se otorga para los vehículos que no lograron detenerse de manera segura antes del cruce peatonal.

- **Intervalo de limpieza**

También conocido como todo rojo y se representa con el color rojo. Es un tiempo en donde todos los semáforos presentan el color “rojo”, es decir se prohíbe el uso de la intersección. Este intervalo se utiliza para limpiar la intersección, es decir permitir al vehículo que se encuentra dentro de la misma poder salir de esta sin causar accidentes.

- **Intervalo de verde**

Representado por el color verde. A lo largo de un ciclo semafórico cada movimiento cuenta con un tiempo de verde, en el cual se permite realizar el cruce vehicular a un respectivo movimiento.

- **Intervalo de rojo**

Se representa con el color rojo. Cada movimiento cuenta con un intervalo rojo durante un ciclo en el cual su desplazamiento está prohibido. En general el intervalo rojo se sobrepone a los intervalos verdes de los otros movimientos.

### **Fase semafórica**

Consiste en un intervalo secuencial de tiempo de verde, ámbar, todo rojo y rojo. En este tiempo a un grupo de movimientos se le permite realizar la entrada y posterior salida de la intersección, mientras que los demás grupos se encuentran detenidos. De esta manera se realiza un movimiento seguro.

## **2.4 Tipos de carriles**

Existen distintas denominaciones para los carriles de una intersección semaforizada. Es decir, un carril puede ser compartido o exclusivo y el mismo puede ser sin oposición, dependiendo de diferentes características. Además, se debe clasificar a los diferentes carriles por grupos de carril y carriles por movimiento. (Roess, Prassas, & McShane, 2011).



#### **2.4.1 Carriles compartidos**

Un carril que comparta más de un movimiento vehicular se considera un carril compartido (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

#### **2.4.2 Carriles exclusivos**

Según (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010), se considera carril exclusivo a todo carril vehicular que permita un único movimiento, ya sea en tiempo parcial o completo.

Existen diferentes recomendaciones para considerar el tener o no un carril exclusivo en una vía, los mismos que se pueden encontrar en (Roess, Prassas, & McShane, 2011). En este trabajo de titulación dichas recomendaciones no son analizadas, debido a que las mismas pueden considerarse como un cambio geométrico de la intersección.

#### **2.4.3 Carriles sin oposición**

Todo carril que no puede poseer un flujo vehicular opuesto es considerado un carril sin oposición (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010). Además, por definición, todo carril únicamente recto, es considerado exclusivo y sin oposición (Roess, Prassas, & McShane, 2011).

#### **2.4.4 Grupo de movimiento**

Es la organización de distintos movimientos posibles en una intersección semaforizada. Se separa un grupo de movimiento de otro, si cada movimiento cuenta con uno o más carriles exclusivos. Además, el movimiento recto es condicionante para generar otro grupo de movimiento (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

#### **2.4.5 Grupo de carriles**

Para definir grupos de carriles, se deben conocer los diferentes movimientos que se pueden realizar en cada carril y según dichos movimientos agrupar los carriles semejantes. En definición, un grupo de carril según (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) es: “un carril o conjunto de carriles designados por análisis separados”.

El grupo de carril es caracterizado por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) bajo los siguientes criterios:

- Un carril o carriles de giro izquierdo exclusivo deberían ser considerados carriles de grupo separados. Misma consideración para carriles de giro derecho exclusivo.
- Cualquier carril compartido debería ser considerado como grupo de carril separado.

- Cualquier carril que no sea exclusivo o compartido debería combinarse en un solo grupo de carril.

## **2.5 Intersecciones señalizadas con semáforos**

Debido a la complejidad que existe al momento de permitir un movimiento en una intersección (Roess, Prassas, & McShane, 2011) presenta tres niveles que facilitan al conductor realizar los movimientos posibles, siendo estos: libre visión de los demás vehículos, señales de parada y utilización de semáforos.

Los dos primeros niveles otorgan al conductor libertad para realizar cualquier movimiento deseado. Sin embargo, cuando se hace uso de semáforos, el juicio de los conductores llega a ser innecesario. “La utilización de semáforos reduce sustancialmente el número y naturaleza de intersecciones conflictivas como otros niveles de control no pueden” (Roess, Prassas, & McShane, 2011).

Autores como; (Roess, Prassas, & McShane, 2011), (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) y (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) presentan ventajas y desventajas de la implementación de sistemas semaforizados tanto para vehículos como para peatones. A continuación, se exhiben las principales ventajas y desventajas presentadas por dichos autores.

### **Ventajas**

- Promueve un movimiento ordenado del tráfico.
- Aumenta la capacidad de manejo del tráfico en la intersección.
- Facilidad de revisar y actualizar el ciclo semafórico.
- Reduce la severidad y frecuencia de accidentes vehiculares.
- Si llegan a ser coordinados, presentan un flujo continuo al sistema vial.
- Interrumpen el tráfico pesado a intervalos, dando movimiento a otro tráfico o flujo peatonal.

### **Desventajas**

- Demoras excesivas.
- Incremento de vías secundarias sin controles semafóricos.
- Incremento de colisiones antes del ingreso a una intersección.

Como se observa, la implementación de semáforos puede ser causante de inconvenientes para el sistema vial. Sin embargo, si este provee de una mayor seguridad al usuario, mejor control del flujo vehicular, se debe implementar un sistema semaforizado.

### **2.5.1 Datos levantados en campo**

Para el análisis de intersecciones semaforizadas es necesario conocer el estado actual de la misma, para ello se procede a realizar un aforo vehicular. En donde los datos levantados deben ser los siguientes según (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010):

- Movimientos dirigidos de cada vía, (giro izquierdo, movimiento recto, giro derecho).
- Volumen peatonal para cada cruce.
- Longitud de ciclo semafórico.
- Cantidad de fases semafóricas.
- Tiempo de verde, ámbar, todo rojo y rojo de cada fase.
- Dimensiones geométricas de cada carril, aceras y cruces peatonales.
- Cantidad de personas que utilizan la acera, pero no cruzan la intersección.

### **2.5.2 Tipos de giros izquierdos**

Existen tres tipos de giros izquierdos que se pueden establecer en una intersección semaforizada, los mismos que se definen a continuación:

#### **2.5.2.1 Giro permitido**

Es aquel giro que se realiza a la par con el flujo opuesto, es decir, no existe una fase semafórica donde ese movimiento no tenga un volumen opuesto nulo, a excepción de una intersección en T donde el carril opuesto sea inexistente, lo cual, en estos casos se vuelve un giro sin oposición (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

#### **2.5.2.2 Giro protegido**

Al contrario del giro permitido, un giro protegido es aquel que usa una fase exclusiva para realizar el movimiento, lo cual no tiene un flujo vehicular opuesto, y en el resto de fases está prohibida realizar esta maniobra. Si la intersección es en T, con la vía opuesta inexistente, el movimiento se vuelve un giro sin oposición (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

#### **2.5.2.3 Giro permitido – protegido**

El giro permitido – protegido, o también conocido como giro mixto, es aquel que tiene una fase protegida para realizar la maniobra y además tiene una fase con flujo opuesto diferente

de cero y con el movimiento permitido. Para intersecciones en T el giro al igual que anteriormente, se vuelve un giro sin oposición (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

### 2.5.3 Consideraciones para giros a la izquierda

“El aspecto más crítico del diseño y la sincronización de la señal es el desarrollo del plan de fase apropiado. Una vez conocido estos datos, muchos otros aspectos de la señalización pueden ser tratados de manera determinista” (Roess, Prassas, & McShane, 2011).

(Roess, Prassas, & McShane, 2011, pág. 491 y 492) presenta recomendaciones para conocer cuando establecer el giro izquierdo permitido, permitido-protegido o protegido. A continuación, se enuncian dichas recomendaciones.

- Si no existe carril de giro izquierdo exclusivo, se recomienda únicamente fase permitida.
- En caso de existir carril izquierdo para giro exclusivo, se verifica si existe un flujo de giro izquierdo igual o mayor a 250 veh/h ó si se cumple la ecuación ( 2 ). Caso contrario se recomienda giro izquierdo permitido

$$V_{LT}V_o / N_o \geq 50000 \quad (2)$$

Donde,

$N_o$ : Número de carriles opuestos para movimiento recto

- Condiciones establecidas en la Figura 1
- Si actualmente existen más de 7 accidentes en los últimos 3 años en la aproximación de la intersección se recomienda giro permitido-protegido.
- Si se cumplen dos de las siguientes afirmaciones se recomienda giro protegido: Volumen de giro izquierdo mayor a 320 veh/h. Flujo opuesto mayor a 1100 veh/h. Velocidad de carril opuesto mayor o igual a 70 km/h. Existencia de dos o más carriles para giro izquierdo.
- Si se cumple una de las siguientes afirmaciones se recomienda giro protegido: Tres carriles opuestos con velocidad mayor a 70 km/h. Flujo vehicular mayor a 320 veh/h con porcentaje de vehículos pesados que giran a la izquierda mayor a 2.5%. Siete o más accidentes por choque angular lateral.

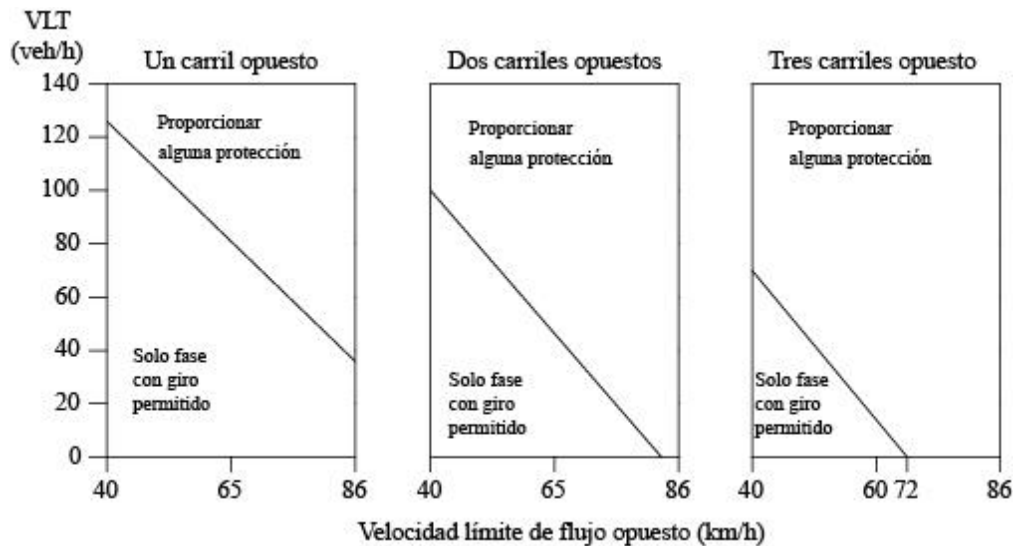


Figura 1 Recomendación de giro izquierdo según (Ardekani, Asante, & Williams , 1993)

## 2.5.4 Nivel de servicio vehicular

(Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010), en sus capítulos 18 y 31 describe metodologías de estimación gradual y de estimación rápida. Dichas metodologías calculan el nivel de servicio y las demoras de intersecciones semaforizadas. En el presente trabajo de titulación se utiliza el método de estimación rápida, por lo que se detalla a continuación.

### 2.5.4.1 Método de estimación rápida

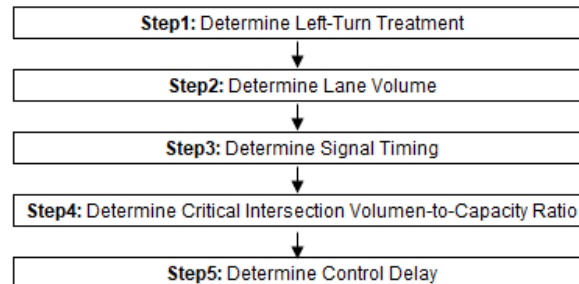
En el libro de (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010, pág. 31\_84) se presenta el método de estimación rápida, donde se llega a estimar; relación crítica de volumen-capacidad, tiempo de fase y demoras para una intersección semaforizada. Este método puede ser utilizado cuando no se cuenta con todos los datos para obtener los factores expresados anteriormente y cuando se desea obtener resultados aproximados.

En el método de estimación rápida se hace uso de las siguientes variables:

- Volumen vehicular.
- Número de carriles por aproximación.
- Volumen de flujo vehicular ajustado.
- Plan de fase para giro izquierdo.
- Longitud del ciclo semafórico.
- Tiempo perdido por vehículo.
- Tiempos de intervalo de verde para cada fase.
- Factor de hora pico.

- Tipo de área.
- Presencia de parqueo.

En este método se encuentra un proceso secuencial, presentado en la Figura 2:



*Figura 2 Pasos para analizar intersecciones semaforizadas (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010, pág. 31\_84)*

Se inicia determinando el volumen vehicular para los movimientos de giro izquierdo, (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) exhibe un formulario para realizar este cálculo. En Anexo 1 se presenta dicho formulario.

Posterior a este análisis, se calcula el volumen del carril, en este proceso se establece el flujo individual de cada carril (veh/carril/hora) de cada aproximación. De la misma manera, se presenta un formulario Anexo 2. En este paso, es necesario determinar si el movimiento de giro izquierdo es permitido, permitido y protegido o solo protegido.

Los pasos tres y cuatro de la Figura 2, son llevados a cabo con la ayuda del formulario presentado en Anexo 3, en este se determina el tiempo de las fases semafóricas, relación crítica de volumen-capacidad. Para continuar con el quinto paso, se calculan las demoras existentes en el grupo de carril, en toda la aproximación y en la intersección.

El método se da por culminado una vez los valores de demora sean interpretados por los criterios de los niveles de servicio vehicular (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

#### **2.5.4.2 Criterios de los niveles de servicio vehicular**

(Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) presenta criterios para conocer los niveles de servicio vehicular, LOS (Level Of Service), peatonal o de ciclista. Se puede verificar el nivel de servicio para cada grupo de carril, aproximación y/o intersección

Para caracterizar el nivel de servicio que existe en cada grupo de carril se utiliza tanto las demoras como la relación de volumen-capacidad (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

Los niveles de servicio dados por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) vienen dados en el rango de “A” hasta “F”, siendo el nivel “A” una intersección con un flujo bastante bueno, mientras que el nivel F representa una intersección completamente saturada. Las demoras van aumentando conforme se aproxima a la calificación “F”. Si el volumen capacidad es superior a 1 se considera un nivel de servicio F, sin importar las demoras existentes en la intersección.

En la Tabla 3 se presenta los criterios del nivel de servicio vehicular.

Control de demoras (s/veh)	LOS by Volume-to-Capacity Ratio	
	$\leq 1.0$	$> 1.0$
$\leq 10$	A	F
$> 10-20$	B	F
$> 20-35$	C	F
$> 35-55$	D	F
$> 55-80$	E	F
$> 80$	F	F

*Tabla 3 Criterio para el nivel de servicio vehicular (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010, pág. 18\_6)*

“El nivel de servicio es una indicación de la aceptabilidad general de la demora por parte de los conductores” (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010). Se debe considerar que los niveles aceptados en grandes urbes no necesariamente son aceptados en zonas rurales. Se debe verificar que cada grupo de carril este proporcionando una operación aceptable.

### 2.5.5 Nivel de servicio peatonal según HCM 2010

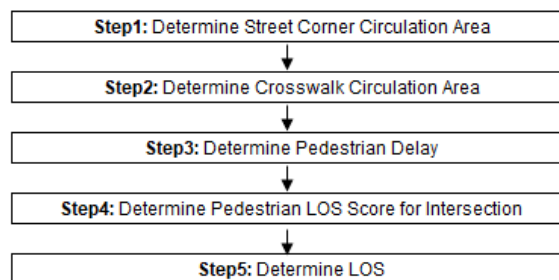
Debido a que el peatón llega a ser parte importante en el funcionamiento de una intersección semaforizada (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) recomienda que, al realizar análisis o variaciones en el funcionamiento de una intersección semaforizada, se deben conocer las habilidades, limitaciones y requisitos con el que cuenta el peatón en los diferentes accesos.

Los peatones al igual que los conductores deben ser estudiados, y posteriormente guiarlos de manera adecuada para que estos funcionen en sincronía. Según (Cal y Mayor & Cárdenas, 1972) el peatón además de ser una víctima del tránsito, también es una de sus causas, para ello los semáforos peatonales son los encargados de brindar un mejor control para el cruce peatonal. En el libro HCM 2010 se analiza:

- Área de circulación de cada esquina.
- Área de circulación en el cruce peatonal.
- Demoras peatonales.
- Nivel de servicio peatonal.

Como se observa se analiza dos tipos de secciones, en la primera corresponde al área de circulación del peatón. Mientras que en la segunda encontramos la percepción con la que cuenta el peatón al momento de realizar un cruce.

En la Figura 3, se presenta el esquema dado por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) para evaluar los flujos peatonales.



*Figura 3 Proceso para análisis peatonal, ( (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010), pag18-60)*

A continuación, se describen algunos de los parámetros considerados para el análisis del flujo peatonal:

- Para evaluar las esquinas de una intersección se compara el tiempo de espera, el espacio disponible y el volumen peatonal que desea atravesar cada vía.
- Se considera el área con el que cuenta el cruce peatonal, el tiempo que se tiene para realizar el cruce y la velocidad del peatón, mismo que disminuye conforme encontramos un superior volumen de gente mayor.
- Se entiende como demora peatonal, el tiempo que el usuario espera para poder realizar su movimiento.

#### **2.5.5.1 Caminata del peatón**

Para que un peatón logre cruzar una vía (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010), dicta tres opciones de que el individuo realice la maniobra, siendo estas:

- Fases semafóricas para peatones.
- Pulsadores para cruce peatonal.
- No existencia de señales para cruce peatonal.



En cada uno de estos, el tiempo permitido para que el peatón realice su caminata varía. Por tal motivo, al analizar el volumen peatonal, el analista debe considerar la mejor opción para el flujo peatonal como vehicular. Ya que las demoras entre ambos flujos llegan a ser inversamente proporcional.

### 2.5.5.2 Criterios de los niveles de servicio peatonales

(Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) presenta criterios de caracterización del espacio de circulación, Tabla 4 y el nivel de servicio del peatón, Tabla 5.

Pedestrian Space (ft <sup>2</sup> /p)	Description
>60	Ability to move in desired path, no need to alter movements.
>40-60	Occasional need to adjust path to avoid conflicts
>24-40	Frequent need to adjust path to avoid conflicts
>15-24	Speed and ability to pass slower pedestrians restricted
>8-15	Speed restricted, very limited ability to pass slower pedestrians
<=8	Speed severely restricted, frequent contact with other users

*Tabla 4 Descripción cualitativa del espacio peatonal (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010, pág. 18\_7)*

LOS	LOS Score
A	<=2.00
B	>2.00-2.75
C	>2.75-3.50
D	>3.50-4.25
E	>4.25-5.00
F	>5.00

*Tabla 5 Criterio del nivel de servicio peatonal (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010, pág. 18\_7)*

## 2.6 Microsimulación

La microsimulación consiste en modelar a detalle el tráfico y el entorno del mismo, por lo cual, se utilizan los SIG, de modo que el análisis sea lo más parecido a la realidad. De esta manera se logra obtener un sistema integro, donde se puede determinar el nivel de servicio y las demoras en el tráfico (D'Ambrogio, Iazeolla, & Pieroni, 2009).

Además, según (D'Ambrogio, Iazeolla, & Pieroni, 2009), la microsimulación permite modelar sistemas reales donde se pueden variar condiciones geometrías o semaforicas, buscando mejorar el tráfico del sector. Por lo tanto, se puede realizar un análisis virtual y lograr

determinar una mejora a una intersección semaforizada o no, a un redondel o intersecciones complejas.

### **2.6.1 Alcance**

A continuación, se detallan los alcances más significativos de la microsimulación sin considerar el proveedor del servicio según (Roca, 2010)

- Estudios sobre redes arteriales o de autopistas.
- Estudios de impactos de grandes construcciones.
- Planes de evacuación.
- Desarrollo de estrategias de gestionamiento de autopistas.
- Esquemas de tránsito calmado.
- Estudios sobre sistemas de transporte masivo.
- Evaluaciones de priorización del transporte público.
- Diseño y evaluación de terminales.
- Diseño y evaluación de peajes.
- Análisis de cruces a nivel con vías férreas.
- Evaluación de sistemas ITS.
- Otros.

#### **2.6.1.1 Generalidades en intersecciones semaforizadas**

Según (Roca, 2010) la microsimulación se divide en dos componentes uno estático y otro dinámico. El primero consiste en todo aquello que no puede variar en el transcurso de la ejecución del programa, es decir, En el caso de intersecciones semaforizadas, el entorno geométrico. El componente dinámico en cambio, es todo aquello que interactúa con los diferentes elementos del sistema, de igual manera en el caso de intersecciones semaforizadas se trata de; fases y ciclos semafóricos y, flujo vehicular y peatonal.

Para intersecciones semaforizadas se puede modificar los componentes estáticos y dinámicos, dependiendo de la complejidad de la situación, es decir, la capacidad de intervención en la intersección, debido al ámbito económico y espacial. Se debe analizar primero la posibilidad de optimizar los componentes dinámicos de fases y ciclos semafóricos (University of Calabria, 2018), y en caso de no obtener una solución al sistema se procede al análisis de intervención en los componentes estáticos, de modo que las demoras y nivel de servicio del lugar cumplan los requisitos óptimos.

### 2.6.2 Software a utilizar

Para el presente trabajo de titulación se utiliza el software libre Tritone, de la Universidad de Calabria – UNICAL (Grupo TIS).

Este software de microsimulación puede representar el tráfico y su evolución al instante, considerando la geometría del sistema, el comportamiento de los conductores. Debido a estas características, se pueden simular intersecciones señalizadas y no señalizadas, redondeles y tráfico de autobuses. Además, se consideran características de seguridad, impactos auditivos y modelos de vehículo. Existen diferentes modelos de vehículo que se pueden utilizar, esto quiere decir que la metodología de microsimulación puede cambiarse por diferentes modelos de vehículos, entre los cuales los más comunes según (University of Calabria, 2018) son:

- Lane-Changing (Giofrè, MOBIL (IDM2000), Gipps (AIMSUN))
- Gap-Acceptance
- Over-taking (Giofrè 2010, Giofrè 2016, Gipps (AIMSUN))

## CAPÍTULO 3

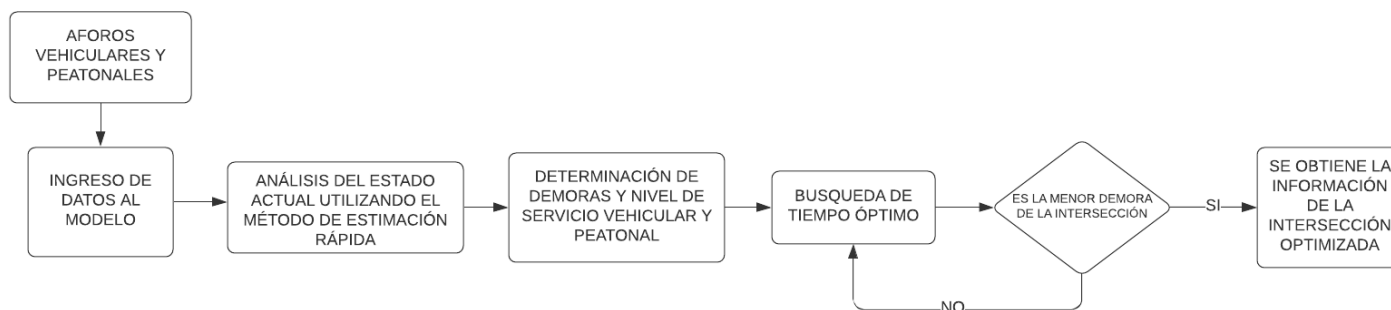
### 3 METODOLOGÍA

A continuación, se presenta los métodos considerados para el desarrollo del modelo de optimización semafórico, siendo estos métodos: recopilación de datos, desarrollo del modelo mediante lenguaje de programación y validación de resultados con software Tritone.

El análisis de una intersección semaforizada demanda el uso de distintos parámetros de entrada, los cuales son utilizados en cálculos que se realizan de manera secuencial para llegar a conocer el nivel de servicio vehicular y peatonal de la intersección de análisis.

Para facilitar el cálculo de demoras y nivel de servicio de intersecciones semaforizadas, en el presente trabajo de titulación se elabora un modelo que calcula dichos parámetros en el estado actual de las intersecciones y además el modelo optimiza las fases y ciclos semafóricos. De esta manera se disminuye en lo posible las demoras vehiculares de la intersección. Además, el modelo elaborado caracteriza el espacio del cruce peatonal y acera de espera.

A continuación, se exhibe en el Esquema 1, el algoritmo utilizado para la obtención de un modelo que sirva para la optimización de ciclos semafóricos en intersecciones de tres y cuatro ramales.



*Esquema 1 Esquema del modelo de optimización semafórico*

Para la búsqueda del tiempo óptimo de intervalos de verde para las fases semafóricas se realiza un proceso determinístico, que calcula todas las posibilidades de configuración semafórica y determina la combinación con menor tiempo de demora en la intersección.

### **3.1 Desarrollo de modelo de optimización mediante el software Microsoft Excel**

En la búsqueda de los intervalos de verde para determinar las demoras y nivel de servicio tanto vehicular como peatonal el modelo de optimización utiliza la el método de estimación rápida expuesta por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) precisamente las secciones de flujo vehicular en intersecciones semaforizadas y análisis peatonales este tipo de intersecciones.

Todos los procesos presentados por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) son incorporados en Microsoft Excel, donde mediante macros programados en el lenguaje Visual Basic se llega a calcular las demoras y nivel de servicio para vehículos y peatones en estado actual y optimizado de la intersección y presenta los resultados del análisis.

#### **3.1.1 Hipótesis del modelo**

El modelo de optimización procura otorgar una mejor configuración semafórica; fase semafórica e intervalos de verde. Para mejorar el flujo vehicular de la intersección. Al mismo tiempo que caracteriza a esta desde el punto de vista de los peatones.

#### **3.1.2 Procesos del modelo**

En el modelo de optimización encontramos tres procesos, siendo estos; estado actual, estado optimizado y resultados.

En el primer proceso se ingresa los datos pertinentes al funcionamiento actual de la intersección, para posteriormente analizar, calcular y conocer el nivel de servicio vehicular y peatonal de la intersección.

El proceso continúa con la optimización de la fase semafórica y los intervalos de verde; analizando, calculando y llegando a determinar el nuevo nivel de servicio vehicular y peatonal de la intersección.

Finalmente, el modelo de optimización culmina presentando los resultados del análisis vehicular y peatonal del estado actual y optimizado de la intersección analizada.

#### **3.1.3 Alimentación del modelo**

En Tabla 6 y Tabla 7 se presentan los datos de entrada del modelo de optimización semafórico para la sección de análisis vehicular y peatonal respectivamente.

Datos de entrada para análisis vehicular			
Tipo de área	Intervalos de verde	Número de carriles	Factor de hora de máxima demanda
Intersección coordinada	Intervalos de ámbar	Número de carriles por movimiento	Porcentaje de vehículos pesados
Flujo de saturación	Intervalos de todo rojo	Número de carriles exclusivos	Maniobras de parqueo
Fase semafórica	Velocidad permitida	Volumen vehicular	Número de accidentes antes de la intersección
Número de accidentes antes en la intersección			

*Tabla 6 Datos de entrada para análisis vehicular*

Datos de entrada para análisis peatonal	
Número de carriles que cruza	Ancho de veredas
Cantidad de islas a la derecha	Volumen peatonal
Dimensiones del cruce peatonal	Velocidad de los peatones
Radios de esquinas	

*Tabla 7 Datos de entrada para análisis peatonal*

### 3.1.4 Limitaciones del modelo

A pesar de que el modelo de optimización semafórico analiza cualquier configuración de intersecciones de 3 y 4 ramales. Este se ve limitado si en ellas encontramos vías con más de tres carriles.

Debido a que para el análisis de las demoras vehiculares se decidió utilizar una base de datos de configuraciones semafóricas. El usuario no cuenta con la libertad de emplear cualquier configuración semafórica que desee. Sin embargo, y considerando resolver este inconveniente se incluyen 103 posibilidades de configuración de fases al modelo de optimización.

Por otro lado, a pesar de que el tiempo permitido de caminata en el análisis peatonal es una variable básica y (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) presenta tres métodos para la obtención de este tiempo. El modelo de optimización limita el análisis al uso de uno de ellos, siendo este el tiempo permitido durante una fase semafórica vehicular, mientras que los otros métodos no se les toma en cuenta debido a que, en la ciudad de Cuenca, Ecuador el uso de semáforos con pulsadores o ciclos exclusivos para peatones llega a ser bajo.

### 3.1.5 Ventajas y desventajas del modelo de optimización

A continuación, se detallan algunas ventajas y desventajas presentes en el modelo de optimización semafórico.

#### **Ventajas**

- Análisis simultáneo tanto vehicular como peatonal
- Selección automática de la fase recomendada
- Obtención rápida de la configuración semafórica de la intersección
- Rápida obtención de intervalos de verde de ciclos semafóricos en intersecciones aisladas

#### **Desventajas**

- Al ser un método de estimación rápida los resultados presentan una menor precisión que otros métodos.
- Análisis de intersecciones con un máximo de 3 carriles por sentido.
- Al tomar la teoría y recomendaciones dadas por (HCM, 2010) y al ser este un manual aplicado en Estados Unidos, su incorporación no llega a ser tan real para la actualidad de la ciudad de Cuenca, Ecuador.

En las siguientes secciones se presenta de manera detallada los procesos para la determinación de las demoras y nivel de servicio, tanto vehicular como peatonal del estado actual y optimizado de las intersecciones.

### 3.2 Estado actual

Se determinan las demoras y nivel de servicio de la intersección con la metodología de estimación rápida, presentada por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010). Para la realizar los cálculos pertinentes, en el modelo desarrollado se deben ingresar datos de entrada, mismos que se detallan en las siguientes secciones.

#### 3.2.1 Ingreso de datos

En el presente modelo de cálculo se analiza tanto los flujos vehiculares como peatonales, por tal motivo, se ingresan los datos pertinentes para ambos análisis. Para ello se tomó como base de datos las 81 intersecciones analizadas por (Aviles, 2015). De dicha base de datos, debido a que no contaban con sistemas semaforizados, o por falta de información, se analizan y optimizan 16 intersecciones.

Los datos volumétricos de vehículos y peatones, intervalos de verde, ámbar, rojo, ciclo semafórico fueron ingresados transcribiendo dicha información de los archivos obtenidos.

Posteriormente, para culminar el ingreso de datos se utiliza la herramienta (Google, Inc, s.f.) para conocer el número de carriles que existe en cada aproximación, presencia de islas para realizar giro a la derecha, presencia de veredas y una estimación rápida de las dimensiones de estas aceras.

Los datos ingresados al modelo de optimización son expuestos de mejor manera en las siguientes secciones.

### **3.2.1.1 Datos vehiculares**

Como datos de entrada son ingresados los siguientes parámetros: Tipo de área, coordinación de semáforos, velocidad permitida, número de carriles por movimiento y exclusivos, volumen de flujo vehicular, factor de hora de máxima demanda, maniobras de parqueo, accidentes de aproximación, accidentes por choque lateral angular, configuración semafórica e ingreso de tiempo de verdes actuantes, ámbar y todo rojo. A continuación, se detallan dichos datos a utilizar.

#### **3.2.1.1.1 Tipo de área**

Se debe conocer si el tipo de área de la intersección semaforizada corresponde a un área central de negocios, CBD, o en caso contraria se determina el área como otros. Se considera un área CBD a todo sector que cuente con cualquiera de las siguientes descripciones según (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010): “Servidumbre de paso en calles estrechas, frecuentes maniobras de parqueo, actividad de taxis y autobuses, giros de radios pequeños, uso limitado de carriles de giro exclusivo, alta actividad peatonal, población densa y cortes de acera a mitad de la cuadra”

Una vez seleccionada el área como CBD u otros, se establece un factor de área,  $f_a$ , que corresponde a 0.9 o 1, respectivamente.

#### **3.2.1.1.2 Coordinación de semáforos**

Debido a la importancia de ciertas intersecciones semaforizadas, es común encontrar dos o más semáforos que poseen la misma configuración semafórica y que están coordinadas según la necesidad de la cada vía.



Una vez establecida la existencia o no de una intersección coordinada, se debe calcular un factor de progresión,  $PF$ , que representa la efectividad de la coordinación. En caso de ser una intersección descoordinada se utiliza  $PF$  igual a 1 y caso contrario se utiliza la ecuación ( 3 ), obtenida de (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

$$PF = \frac{1 - \left(1.33 \frac{g}{C}\right)}{1 - g/C} \quad (3)$$

Donde:

$PF$ : Factor de progresión, (-).

$g/C$ : Radio de verde o proporción de verde, (-). Detallado en sección 3.2.2.6.

#### **3.2.1.1.3 Velocidad permitida**

Se debe ingresar la velocidad permitida para cada una de las aproximaciones. Estas velocidades son utilizadas en el cálculo del nivel de servicio peatonal y para la recomendación de fases según (Roess, Prassas, & McShane, 2011).

#### **3.2.1.1.4 Número de carriles por movimiento y exclusivos**

Para realizar los cálculos según el método de estimación rápida, se utiliza únicamente el grupo de carril, es por ello que para una correcta selección del grupo de carril se debe conocer los movimientos permitidos en cada carril. Para ello, en el modelo de algoritmo utilizado se procede a establecer dichas características según el número de carriles por movimiento ya sean compartidos o no y el número de carriles exclusivos. Además, se debe conocer el número de carriles totales, para evitar errores de ingreso de datos.

El modelo utilizado sirve para vías con un máximo de tres carriles por sentido, debido a las recomendaciones de configuraciones semafóricas utilizadas para el modelo de optimización. Bajo este valor máximo de carriles se debe proceder a diferenciar el número de carriles por movimiento y exclusivos existentes, con lo cual, se analiza el grupo de carril según las siguientes reglas establecidas en (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010), las mismas que se muestran a continuación:

- Un carril o carriles de giro izquierdo exclusivo deberían ser considerados carriles de grupo separados. Misma consideración para carriles de giro derecho exclusivo.
- Cualquier carril compartido debería ser considerado como grupo de carril separado.
- Cualquier carril que no sea exclusivo o compartido debería combinarse en un solo grupo de carril.

Bajo estas consideraciones se muestran las posibilidades que existen para configurar los grupos de carriles, bajo su respectiva nomenclatura:

- Carril exclusivo de giro izquierdo, I.
- Carril exclusivo de giro derecho, D.
- Carril exclusivo movimiento recto, R.
- Carril compartido de giro izquierdo y movimiento recto, I & R.
- Carril compartido de giro izquierdo y derecho, I & D.
- Carril compartido de movimiento recto y giro derecho, R & D.
- Carril compartido de giro izquierdo, derecho y movimiento recto, I, R & D.

#### 3.2.1.1.5 Volumen de flujo vehicular

El volumen de flujo vehicular corresponde al valor obtenido en los aforos de la intersección para cada uno de los grupos de movimiento, estos representan el flujo en la hora de máxima demanda. Dicho volumen debe ser ingresado en el modelo para cada aproximación y correspondiente al giro izquierdo,  $V_L$ , movimiento recto,  $V_T$  y giro derecho,  $V_R$ .

#### 3.2.1.1.6 Factor de hora de máxima demanda

El factor de hora de máxima demanda, PHF, se calcula mediante la ecuación ( 4 ).

$$PHF = \frac{n_{60}}{4n_{15}} \quad (4)$$

Donde:

$PHF$ : Factor de hora de máxima demanda, (-)

$n_{60}$ : Cantidad de vehículos en la hora de máxima demanda, (veh /h)

$n_{15}$ : Cantidad de vehículos en los 15 min de máxima demanda, (veh/0.25h)

Este valor debe ser ingresado por el usuario para cada carril.

#### 3.2.1.1.7 Maniobras de parqueo

Se debe conocer las maniobras de parqueo existentes en cada aproximación para la hora pico,  $N_m$ . Dichas maniobras generan un factor de ajuste por parqueo,  $f_p$ , que debe ser mayor o igual a 0.05. La ecuación ( 5 ) presenta el factor de ajuste por parqueo.

$$f_p = \frac{N_{TH} - 0.1 - \frac{18N_m}{3600}}{N_{TH}} \geq 0.05 \quad (5)$$

Donde:

$f_p$ : Factor de parqueo, (-)

$N_m$ : Maniobras de en la hora de máxima demanda, (maniobras/h)

$N_{TH}$ : Número de carriles rectos, (-)

Este factor se utiliza para ajustar el volumen de flujo recto, como se ve en la sección 3.2.2.4.

#### **3.2.1.1.8 Accidentes de aproximación y por choque lateral angular**

La cantidad de accidentes durante los últimos tres años en la aproximación de cada vía y al momento de realizar el giro en la intersección, es un factor crucial para la recomendación de una fase protegida de giro izquierdo, ya que según (Roess, Prassas, & McShane, 2011), si existen más de siete accidentes de los mencionados en una vía con fase permitida en los últimos tres años, ésta debe contar con una fase completamente protegida.

#### **3.2.1.1.9 Selección de configuración semafórica**

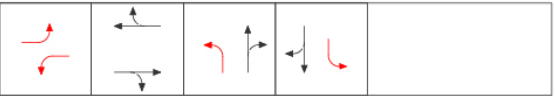
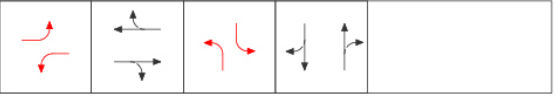
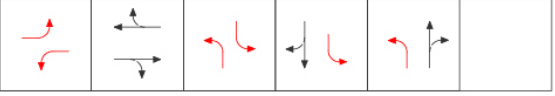
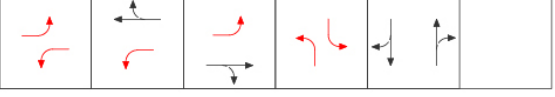
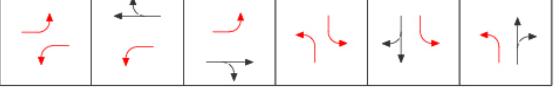
Debido a la gran variedad de configuraciones semafóricas existentes se utiliza una base de datos donde se presentan ciento tres alternativas de configuraciones semafóricas, presentadas en el Anexo 4. Estas alternativas dependen del tipo de giro izquierdo, pudiendo ser: Giro permitido, giro protegido-permitido y giro protegido.

Cada alternativa tiene un código numérico de cuatro dígitos, donde secuencialmente las posiciones corresponden al ESTE, OESTE, NORTE y SUR. Cada número del código puede ser 0, 1 o 2, y figuran un giro permitido, protegido-permitido o protegido, respectivamente.

Debido a la gran variedad de posibilidades existentes de configuración de fases en una intersección semaforizada, en el módulo de entrada de datos para el estado actual de la intersección se procede a seleccionar el tipo de giro izquierdo para cada aproximación y según esta información se procede a seleccionar el código requerido de la lista de opciones presentadas, tal como se muestra en el siguiente ejemplo en la Ilustración 1.

CONFIGURACIÓN DE FASE ACTUAL

**ESQUEMA DE FASES**

CODIG-OPC	ESQUEMA DE FASES
2222-0	
2222-1	
2222-2	
2222-3	
2222-4	

TIPO DE MOVIMIENTO  
**MOVIMIENTO PERMITIDO** **MOVIMIENTO PROTEGIDO**

**GIRO IZQUIERDO**

**ESTE** **OESTE**

Giro Izq. Protegido \* Giro Izq. Protegido \*

**NORTE** **SUR**

Giro Izq. Protegido \* Giro Izq. Protegido \*

**VER FASES**

**ESCRIBIR FASE**

**CÓDIGO** **OPCIÓN**

-  \*

Escribir la fase deseada, orientándose en el esquema de fases.

Ingresar primero el código 4 dígitos, posteriormente la opción 1 dígito.

EJM: 0102 - 1

**ACEPTAR**

**LIMPIAR**

INDISPENSABLES PARA ANÁLISIS \*

Software: Alvarez & Picón, 2020

*Ilustración 1 Configuración de fase actual, obtenido de módulo de cálculo elaborado por Alvarez & Picón*

### 3.2.1.2 Condiciones para el análisis del flujo peatonal

Debido a la importancia de los peatones para intersecciones semaforizadas, (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) cuenta con diferentes medidas para analizar la intersección. Este analiza el área de circulación de cada esquina, área de circulación de cada cruce, demora de los peatones y el nivel de servicio peatonal. Para el presente trabajo de titulación se decidió realizar un análisis completo del nivel de servicio peatonal.

Para el análisis de cada esquina de intersecciones tipo cruz, se cuenta con dos vías perpendiculares entre ellas. Se diferencia a ambas vías considerando que una de ellas es la vía principal, mientras que la otra es la secundaria. De esta manera contamos con dos consideraciones siendo estas:

- Condición 1: el peatón realiza el cruce de la vía secundaria, mientras el flujo vehicular es permitido en la vía principal.
- Condición 2: el peatón realiza el cruce de la vía principal, mientras el flujo vehicular es permitido en la vía secundaria.

De la misma manera para los análisis del espacio existente en los cruces peatonales, se cuenta con estas dos condiciones, en donde el cruce de los peatones se ve afectado por

los volúmenes vehiculares de giro hacia la vía en donde se encuentra el cruce peatonal permitido.

Para las demoras las condiciones se alteran, ya que el peatón que desea cruzar cualquiera de las aproximaciones, en el peor de los casos debe esperar en la acera todo el intervalo de verde de la vía a cruzar. Esta demora se considera para determinar el posterior nivel de servicio peatonal.

En las siguientes secciones se presentan los datos que deben ser ingresados para un completo análisis peatonal.

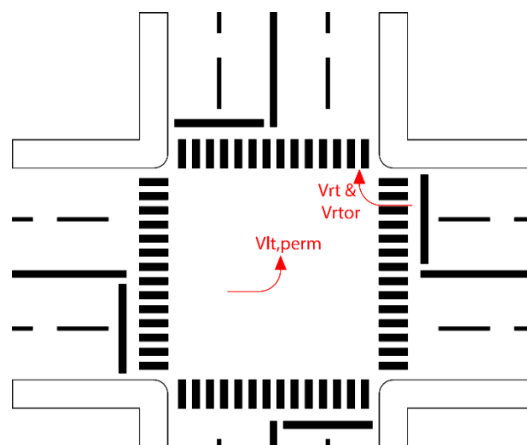
### 3.2.1.3 Datos peatonales

Se debe considerar el flujo vehicular, flujo peatonal y las dimensiones con las que cuenta cada intersección.

Los datos peatonales que se deben levantar en campo son; volumen vehicular que interfiere con el cruce de peatones, cantidad de carriles que cruza el peatón, presencia de isla para giro vehicular hacia la derecha, velocidad de cruce de los peatones, dimensiones de las veredas, dimensiones de los cruces peatonales y volumen peatonal. Los mismos que son detallados en las siguientes secciones.

#### 3.2.1.3.1 Volumen vehicular que interfiere con el cruce de peatones

Es el espacio con el que cuentan los peatones al realizar el cruce de la intersección, este se ve reducido si existen movimientos vehiculares que utilizan la vía en ese mismo instante, se presenta un esquema de cuáles son los volúmenes considerados para el cruce peatonal por la vía norte.



*Esquema 2 Volúmenes que interfieren en el cruce peatonal*

Donde:

$V_{lt,perm}$ : volumen vehicular que gira hacia la izquierda de manera permitida (veh/h)

$V_{rt}$ : volumen vehicular que gira a la derecha (veh/h)

$V_{rtor}$ : volumen vehicular que gira a la derecha en intervalo de rojo (veh/h)

Dichos volúmenes son considerados para todos los cruces de la intersección, además, estos datos se toman de los aforos vehiculares ingresados en pasos previos.

#### **3.2.1.3.2 Cantidad de carriles que cruza el peatón**

Se ingresa el número de carriles que el peatón debe cruzar para llegar a la esquina de enfrente, independientemente de que si la vía es de doble sentido o un solo sentido. En el caso de que la vía presente una isla de espera en la mitad de la vía, esta no es considerada, ya que se considera que la isla es un espacio seguro para el peatón.

Se ingresa la cantidad de carriles que cruza el peatón para todas las vías.

#### **3.2.1.3.3 Presencia de isla para giro vehicular hacia la derecha**

Si la aproximación antes de llegar a la intersección presenta una isla para permitir el giro de vehículos hacia la derecha en cualquier instante. Esta se debe considerar en el análisis, ya que disminuye los volúmenes de vehículos que giran a la derecha e interfieren con el cruce peatonal.

El ingreso de la presencia de islas para realizar el giro hacia la derecha se repite en cada aproximación.

#### **3.2.1.3.4 Velocidad de cruce de los peatones**

Debido a la variedad de instituciones que se pueden presentar cerca de una intersección semaforizada o diversidad de peatones, el analista tiene la posibilidad de ingresar la velocidad de cruce de los peatones,  $S$ , dependiendo de la necesidad de cada intersección.

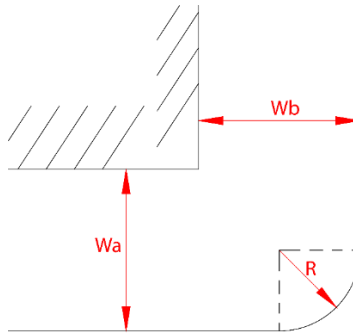
(Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) recomienda una velocidad de 1.2 m/seg. Sin embargo, para personas jóvenes la velocidad llega a ser de 0.8 m/seg y para personas mayores de 1.4 m/seg según (Roess, Prassas, & McShane, 2011).

#### **3.2.1.3.5 Dimensiones de las veredas**

El peatón cuenta con un espacio límite durante la espera del mismo para poder realizar el cruce, esta área es brindada por la acera. Sin embargo, esta se ve reducida por los flujos

de personas que usan la acera o que cruzan hacia la otra vía. El analista debe ingresar el ancho de ambas veredas,  $W_a$  y  $W_b$ . Estos datos se ingresan para todas las esquinas, dando un total de ocho dimensiones de veredas.

Además, se debe introducir el radio de las esquinas. Con un total de cuatro esquinas en una intersección tipo cruz. En el Esquema 3 se presentan las dimensiones ingresadas de cada esquina.

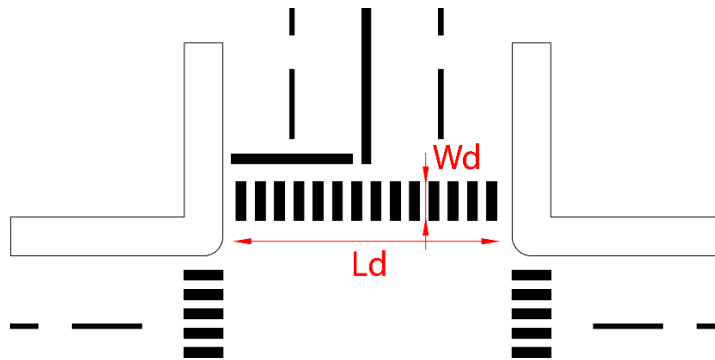


*Esquema 3 Dimensiones de las esquinas de aceras*

#### 3.2.1.3.6 Dimensiones de los cruces peatonales

La superficie utilizada para realizar el cruce de peatones debe ser el área que se brinda a los mismos gracias al cruce peatonal. Para ello se ingresan las dimensiones de ancho del cruce,  $W_d$ , y del largo del mismo,  $L_d$ , para cada uno de los cruces.

En Esquema 4 se exhibe las dimensiones de los cruces peatonales.



*Esquema 4 Dimensiones de los cruces peatonales*

#### 3.2.1.3.7 Volumen peatonal

En una intersección se encuentra a personas que usan la misma para cruzar un carril o simplemente para cambiar de dirección en la esquina. Ambos aforos están correlacionados

y por tal motivo (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) para realizar un análisis completo recomienda considerar estos valores de flujos peatonales.

En una intersección semaforizada se encuentran los siguientes volúmenes peatonales, estos son exhibidos en Esquema 5.

### **Volumen de peatones que cruza alguna vía**

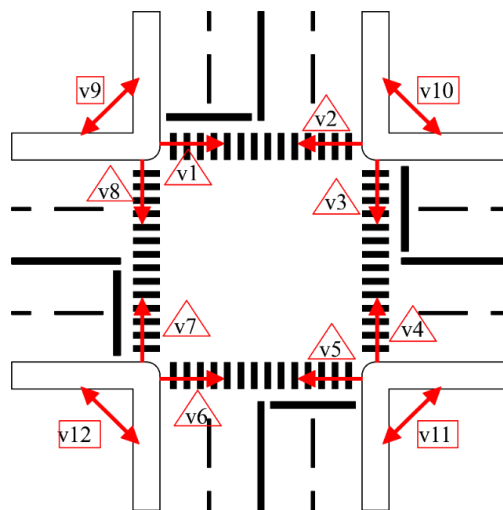
Es el volumen más conflictivo, estos en una primera instancia llegan a la esquina y se detienen, esperan que el intervalo de verde culmine y posteriormente realizan el cruce de la vía. Encontrándose con el flujo del lado opuesto, acción que obliga a estos a realizar movimientos evasivos.

En una intersección tipo cruz, encontramos ocho volúmenes de peatones de este tipo. En el modelo realizado se debe ingresar los datos de estos cruces en la dirección correspondiente en unidades de personas/hora. Las variables se expresan como  $v_1$ ,  $v_2$ , ...,  $v_8$  en Esquema 5.

### **Volumen de peatones que utilizan la intersección sin cruzar alguna vía**

Estos peatones a pesar de no realizar un cruce de alguna vía, usan un porcentaje del área de las aceras. Llegando así a disminuir la superficie con la que cuentan las personas que están detenidas en las aceras mientras esperan poder realizar su respectivo cruce.

La unidad de medida para el volumen de peatones que utilizan la intersección sin cruzar vía alguna es en personas/hora y estas variables se muestran en:  $v_9$  -  $v_{12}$  en Esquema 5.



*Esquema 5 Volúmenes peatonales de una intersección tipo cruz*



### 3.2.2 Estado actual demoras y nivel de servicio vehicular

Para realizar el cálculo de demoras y nivel de servicio vehicular se utilizan los formularios expuestos en (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) presentados en Anexo 1, Anexo 2 y Anexo 3, donde se presentan los siguientes cálculos: Primero realizar la selección del tipo de carril, tras ello se ajusta los volúmenes de giro izquierdo, derecho y el movimiento recto. Una vez ajustado el volumen vehicular se selecciona el grupo de carril actuante, con su respectivo número de carriles y volumen ajustado. Con todos estos datos ya obtenidos se procede a determinar la proporción de verde, el flujo de saturación, el volumen/capacidad, la capacidad del grupo de carril, el factor de ajuste progresivo, la demora uno y dos junto con el nivel de servicio del grupo de carril. Culminando con el cálculo de la demora por acercamiento con su respectivo nivel de servicio, el flujo vehicular de aproximación total, la demora de la intersección y el nivel de servicio de la misma.

Todos los cálculos antes mencionados se presentan detallados a continuación.

#### 3.2.2.1 Selección de tipo de carril

El análisis de selección de tipo de carril presentado a continuación se realiza para cada aproximación de la intersección.

El carril para giro izquierdo debe considerarse entre: Permitido, sin oposición o protegido. Si la fase es permitida-protegida para la aproximación, el carril para los cálculos es considerado permitido. A continuación, se muestran los parámetros de selección de tipo de carril para el carril de giro izquierdo.

- Considerar carril permitido si se encuentra en fase permitida o permitida-protegida, con volumen opuesto vehicular mayor a cero. Si el volumen opuesto es igual a cero el carril debe ser considerado sin oposición.
- Considerar carril protegido si se encuentra en fase protegida.

El carril de giro derecho puede ser considerado compartido o exclusivo, según los movimientos permitidos en dicho carril o carriles.

#### 3.2.2.2 Ajuste de giro a la derecha

Se selecciona el número de carriles exclusivos de giro derecho,  $N_{RT}$ , si no existe, se procede a utilizar el valor de uno para los cálculos.

Se utiliza un factor de giro de ajuste derecho,  $f_{RT}$ , el mismo que puede ser de 0.85 o 0.75, dependiendo si se tiene uno o dos carriles de giro derecho exclusivo, respectivamente.

Una vez obtenido  $f_{RT}$ , se procede a calcular el volumen de giro derecho ajustado,  $V_{RT}$ , como se muestra en la ecuación ( 6 ).

$$V_{RT} = \frac{V_R}{N_{RT} f_{RT}} \quad ( 6 )$$

Donde:

$V_{RT}$ : Volumen de giro derecho ajustado, (veh/h)

$V_R$ : Volumen de giro derecho aforado, (veh/h)

$N_{RT}$ : Número de carriles exclusivos de giro derecho, (-)

$f_{RT}$ : Factor de ajuste de giro derecho, (-)

### 3.2.2.3 Ajuste de giro a la izquierda

Conociendo el número de carriles exclusivos de giro izquierdo,  $N_{LT}$ , y el volumen vehicular opuesto de la aproximación,  $V_o$ , se procede a realizar el siguiente cálculo.

El modelo determina según las características de la vía el factor de ajuste de giro izquierdo,  $f_{LT}$ , mismo que es igual a 0.95 para un solo carril y 0.92 para dos carriles de giro izquierdo. Para una aproximación de una sola vía o intersección en T se utiliza un factor de 0.85 para un solo carril y 0.75 para aproximaciones de dos carriles (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

Una vez se conoce  $f_{LT}$ , se procede a determinar el volumen de giro izquierdo ajustado,  $V_{LT}$ , dado en vehículos por hora por carril, mediante la ecuación ( 7 ).

$$V_{LT} = \frac{V_L}{N_{LT} f_{LT}} \quad ( 7 )$$

Donde:

$V_L$ : Volumen de giro izquierdo aforado, (veh/h). Si el giro izquierdo es permitido  $V_{LT} = 0$ .

$f_{LT}$ : Factor de ajuste de giro izquierdo, (-)

$N_{LT}$ : Número de carriles exclusivos de giro izquierdo, (-). Si el giro izquierdo es sin oposición y no existe carril exclusivo de giro izquierdo se utiliza  $N_{LT} = 1$  para el cálculo.

### 3.2.2.4 Ajuste de movimiento recto

Mediante la ecuación ( 8 ), se determina el volumen total ajustado,  $V_{tot}$ .

$$V_{tot} = \frac{V_{RT(compartido)} + V_T + V_{LT(sin\ oposición)}}{f_p} \quad (8)$$

Donde:

$V_{tot}$ : Volumen vehicular total ajustado, (veh/h)

$V_{RT(compartido)}$ : Volumen de giro derecho ajustado compartido, (veh/h)

$V_T$ : Volumen de flujo vehicular recto, (veh/h)

$V_{LT(sin\ oposición)}$ : Volumen de giro izquierdo aforado sin oposición, (veh/h).

$f_p$ : Factor de parqueo, (-)

Una vez obtenido  $V_{tot}$ , se procede a determinar el volumen de flujo vehicular recto ajustado,  $V_{TH}$ , en vehículos por hora por carril, dependiendo si existe giro izquierdo con carril exclusivo o compartido, mediante la ecuación ( 9 ).

$$V_{TH} = \frac{V_{tot}}{N_{TH}} \quad (9)$$

Donde:

$V_{TH}$ : Volumen de flujo vehicular recto ajustado, (veh/h)

$V_{tot}$ : Volumen vehicular total ajustado, (veh/h)

$N_{TH}$ : Número de carriles rectos, (-)

Si existe carril de giro izquierdo compartido entonces se procede a calcular la proporción de giro izquierdo,  $P_{LT}$ , mediante la ecuación ( 10 ). Posteriormente se calcula el factor de equivalencia,  $E_{L1}$ , mediante la ecuación ( 11 ) usando la ecuación ( 12 ), y el factor de ajuste de giro izquierdo,  $f_{DL}$ , mediante la Figura 4.

$$P_{LT} = \frac{V_{tot}}{V_T / N_{TH}} \quad (10)$$

$$E_{L1} = \frac{S_o}{S_p} - I_{sh} \quad (11)$$

$$S_p = \frac{V_o e^{-V_o t_{cg}/3600}}{1 - e^{-V_o t_{fh}/3600}} \quad (12)$$

Donde:

$P_{LT}$ : Proporción de giro izquierdo, (-)

$V_{tot}$ : Volumen vehicular total ajustado, (veh/h)

$V_T$ : Volumen de flujo vehicular recto, (veh/h)

$N_{TH}$ : Numero de carriles rectos, (-)

$E_{L1}$ : Factor de equivalencia, (-)

$S_o$ : Flujo base de saturación, (veh/h/carril)

$S_p$ : Flujo de saturación con giro izquierdo permitido, (veh/h/carril)

$I_{sh}$ : Indicador de carril compartido igual a 1 para carril compartido, (-)

$V_o$ : Volumen de flujo opuesto, (veh/h)

$t_{cg}$ : Avance crítico igual a 4.5 seg y

$t_{fh}$ : Progreso de seguimiento igual a 4.5 seg para carriles compartidos

Giro izquierdo permitido	
Grupos de carril con 2 o más carriles:	Sujeto a un valor mínimo de vehículos para giro izquierdo, donde en algunos ciclos no existirá dicho movimiento:
$f_{DL} = \frac{(N_{TH} - 1) + e^{-(N_{TH}V_LE_{L1})/600}}{N_{TH}}$	$f_{DL(min)} = \frac{(N_{TH} - 1) + e^{-(V_L C_{max})/3600}}{N_{TH}}$
Grupos de carril con un solo carril para todos los movimientos:	
$f_{DL} = e^{-0.02(E_{L1}+10P_{LT})V_L C_{max}/3600}$	
Giro izquierdo permitido más protegido (una sola dirección)	
Si $V_o < 1220 \text{ veh/h}$ , entonces:	Si $V_o \geq 1220 \text{ veh/h}$ , entonces:
$f_{DL} = \frac{1}{1 + \left(\frac{P_{LT}(235+0.435V_o)}{1400-V_o}\right)}$	$f_{DL} = \frac{1}{1 + 4525P_{LT}}$

Figura 4 Determinación de factor de ajuste de giro izquierdo obtenido de (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010)

Con estos factores se procede a calcular,  $V_{TH}$ , mediante la ecuación ( 13 ).

$$V_{TH} = \frac{V_{tot}}{N_{TH}f_{DL}} \quad ( 13 )$$

Donde:

$V_{TH}$ : Volumen de flujo vehicular recto ajustado, (veh/h)

$V_{tot}$ : Volumen vehicular total ajustado, (veh/h)

$N_{TH}$ : Numero de carriles rectos, (-)

$f_{DL}$ : Factor de ajuste de giro izquierdo, (-)

### 3.2.2.5 Volumen ajustado por grupo de carril

El volumen ajustado por grupo de carril,  $V$ , corresponde a la suma de cada volumen ajustado antes determinado multiplicado por el número de carriles por grupo de carril, tal como se requiere según (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010)

Si en la determinación del volumen ajustado para giro izquierdo el valor es igual a cero debido a la inexistencia de carril exclusivo, entonces se procede a utilizar el volumen vehicular para giro izquierdo aforado más el flujo ajustado de para los respectivos movimientos presentes en el grupo de carril de análisis.

### 3.2.2.6 Proporción de verde

Corresponde a la relación existente entre el intervalo de tiempo de verde actuante y el intervalo de tiempo del ciclo de la intersección, para cada uno de los grupos de carril en la intersección. Este valor es representado con las siglas  $g/C$ .

### 3.2.2.7 Flujo de saturación del grupo de carril

Se determina el flujo de saturación del grupo de carril,  $s$ , con la ecuación ( 14 ) y ( 15 ). Dicho valor expresa cuantos vehículos por hora se necesitan para saturar cada carril.

$$s = RS * \text{Num de carriles por grupo de carril} \quad ( 14 )$$

$$RS = 1530 * PHF * f_a \quad ( 15 )$$

Donde:

$s$ : flujo de saturación del grupo de carril, (veh/h/carril)

$RS$ : Flujo vehicular referencial, (veh/h)

$PHF$ : Factor de hora de máxima demanda, (-)

$f_a$ : Factor de área explicado en sección 3.2.1.1.1

### 3.2.2.8 Relación volumen / capacidad

La relación volumen / capacidad,  $X$ , se determina con la ecuación ( 16 ), y corresponde a la relación entre la demanda de flujo vehicular y la capacidad vehicular de cada carril.

$$X = \frac{V/s}{g/C} \quad ( 16 )$$

Donde:

$X$ : Relación de volumen / capacidad, (-)

$V$ : Volumen ajustado por grupo de carril, (veh/h/carril)

$s$ : flujo de saturación del grupo de carril, (veh/h/carril)

$g/C$ : Radio de verde o proporción de verde, (-).

Si la relación volumen / capacidad es superior a uno implica que la vía está saturada y representa un fracaso para la intersección. Si es igual a uno la vía está en un estado límite y si es inferior a uno la vía está en estado operacional y debe comprobarse las demoras que existe en la intersección.

### 3.2.2.9 Capacidad del grupo de carril

La capacidad del grupo de carril,  $c$ , es determinada mediante la ecuación ( 17 ), y corresponde a la máxima cantidad de vehículos por hora que pueden encontrarse en el carril analizado, para que la intersección se encuentre operacional.

$$c = \frac{V}{X} \quad ( 17 )$$

Donde:

$c$ : Capacidad del grupo de carril, (veh/h/carril)

$V$ : Volumen ajustado por grupo de carril, (veh/hora/carril)

$X$ : Relación de volumen / capacidad, (-)

### 3.2.2.10 Demora uniforme

Se calcula la demora uniforme,  $d_1$ , dada en segundos por vehículo, esta corresponde al tiempo de retraso que sufre cada vehículo en los diferentes grupos de carril de la aproximación. Viene dada por la ecuación ( 18 ).

$$d_1 = \frac{0.5 c (1 - g/C)^2}{1 - (\min(1, X) g/C)} \quad (18)$$

Donde:

$d_1$ : Demora uniforme, (seg/veh)

$c$ : Capacidad del grupo de carril, (veh/h/carril)

$X$ : Relación de volumen / capacidad, (-)

$g/C$ : Radio de verde o proporción de verde, (-).

### 3.2.2.11 Demora incremental

La demora incremental,  $d_2$ , dada en segundos por vehículo, corresponde al tiempo de retraso por acumulación de vehículos que sufre cada vehículo en los diferentes grupos de carril de la aproximación. Este es determinado mediante la ecuación ( 18 ).

$$d_2 = 900 T((X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + 4 X / c}) T \quad (19)$$

Donde:

$d_2$ : Demora incremental, (seg/veh)

$T$ : Duración de tiempo de análisis (h). Corresponde a 0.25 para el análisis de 15 min utilizado en el modelo.

$X$ : Relación de volumen / capacidad, (-)

$c$ : Capacidad del grupo de carril, (veh/hora/carril)

### 3.2.2.12 Demora de control y nivel de servicio de grupo de carril

La demora de control,  $d$ , corresponde al tiempo de retraso por vehículo existente en cada grupo de carril y se determina con la ecuación ( 20 ). Esta demora sirve para la determinación del nivel de servicio de cada grupo de carril. Mismo que se determina según la Tabla 8, obtenida de (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

$$d = d_1(PF) + d_2 \quad (20)$$

Donde:

$d$ : Demora de control, (seg/veh)

$d_1$ : Demora uniforme, (seg/veh)

$PF$ : Factor de progresión, (-).

$d_2$ : Demora incremental, (seg/veh)

Control de demoras (s/veh)	LOS by Volume-to-Capacity Ratio	
	$\leq 1.0$	$> 1.0$
$\leq 10$	A	F
$> 10-20$	B	F
$> 20-35$	C	F
$> 35-55$	D	F
$> 55-80$	E	F
$> 80$	F	F

Tabla 8 Determinación de nivel de servicio según (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010)

### 3.2.2.13 Demora y nivel de servicio por aproximación

La demora por aproximación,  $d_A$ , dada en segundos por vehículo, corresponde al retraso por vehículo presente en cada aproximación. Se determina mediante la ecuación ( 21 ).

$$d_A = \frac{\sum(d)(V)}{\sum V} \quad (21)$$

Donde:

$d_A$ : Demora por aproximación, (seg/veh)

$d$ : Demora de control, (seg/veh)

$V$ : Volumen ajustado por grupo de carril, (veh/h/carril)

El nivel de servicio de la aproximación se calcula utilizando la Tabla 8.

### 3.2.2.14 Flujo de aproximación

El flujo de aproximación,  $V_A$ , correspondiente al volumen de vehículos por hora ajustados presentes en la aproximación. Se calcula sumando los volúmenes existentes según lo calculado anteriormente en la sección 0.

### 3.2.2.15 Demora y nivel de servicio de la intersección

La demora de la intersección,  $d_I$ , corresponde al retraso por vehículo presente en toda la intersección y es el promedio ponderado entre las demoras de aproximación y el volumen de cada grupo de carril, tal como se muestra en la ecuación ( 22 ).



$$d_I = \frac{\sum(d_A)(V_A)}{\sum V_A} \quad (22)$$

Donde:

$d_I$ : Demora de control de la intersección, (seg/veh)

$d_A$ : Demora por aproximación, (seg/veh)

$V$ : Volumen de flujo de aproximación, (veh/h/carril)

El nivel de servicio de la intersección se determina utilizando la Tabla 8

### 3.2.3 Estado actual demoras y nivel de servicio peatonal

Se determina el espacio con el que cuentan los peatones para esperar realizar el cruce, el espacio durante el cruce peatonal y el nivel de servicio de los mismos. Estos cálculos son realizados de manera automática utilizando códigos de programación, para ello se toman los datos antes ingresados en la sección 3.2.1.3. Las ecuaciones presentadas en esta sección están en unidades americanas, por tal motivo el algoritmo lee las variables en unidades internacionales, las transforma en unidades americanas, realiza los cálculos y los resultados son exhibidos en unidades internacionales.

Es necesario conocer el tiempo permitido de caminata de los peatones,  $g_{walk}$ , durante el sistema semafórico, actualmente se cuenta con algunas posibilidades para permitir dicho tiempo para los peatones, entre ellos encontramos; fases semafóricas exclusivas para peatones, pulsadores para permitir el paso de peatones, cruce peatonal durante una fase vehicular, entre otros.

En el presenta trabajo de titulación se utilizó como tiempo permitido de caminata el intervalo que se brinda al peatón durante una fase vehicular, este valor se determina de manera automática gracias al intervalo de verde con el que cuenta cada fase semafórica. Se presenta la ecuación ( 23 ), para calcular el tiempo de caminata permitido de los peatones.

$$g_{walk} = D_p - Y - R_c \quad (23)$$

Donde:

$g_{walk}$ : Tiempo permitido de caminata de los peatones, (seg).

$D_p$ : Duración de la fase seleccionada, (seg).

$Y$ : Intervalo de ámbar, (seg).

$R_c$ : Intervalo de limpieza de la intersección, todo rojo, (seg).

El tiempo de caminata que se otorga a cada peatón considera el número de fases que existe en cada ciclo. Es decir, para un ciclo semaforico de dos fases nos encontramos con dos tiempos de caminata para cada sentido, de la misma manera ocurre para ciclos semaforicos con tres, cuatro, cinco o seis fases.

### 3.2.3.1 Determinación del espacio de espera para el peatón en las aceras

Se utiliza el procedimiento descrito por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) para evaluar el estado de cada esquina, en donde en intersecciones tipo cruz normalmente se cuenta con ocho espacios de espera de cruce. Los cálculos se realizan para cada una de las esquinas. Se presenta a continuación los procesos realizados para llegar a conocer el valor antes mencionado. Los mismos que están automatizados por el algoritmo para intersecciones tipo cruz y tipo T.

#### 3.2.3.1.1 Cálculo del tiempo espacio disponible

El tiempo espacio permitido para la circulación de peatones y la creación de una zona de espera para el cruce de peatones,  $TS_{corner}$ , se obtiene con la ecuación ( 24 ).

$$TS_{corner} = C(W_a W_b - 0.215R^2) \quad (24)$$

Donde:

$TS_{corner}$ : Tiempo espacio permitido en la esquina, (ft2-seg).

$C$ : Longitud del ciclo semaforico, (seg).

$W_a W_b$ : Ancho de las aceras, (ft), pág. 45.

$R$ : Radio de la esquina (ft), pág. 45.

Se considera según (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) que, si  $R$  es mayor que  $W_a$  o  $W_b$ ,  $R$  toma el menor valor de entre estos dos anchos de aceras. El cálculo se realiza de manera mecánica para todas las aceras de la intersección debido al ingreso de los datos expuestos en la pág. 45.

#### 3.2.3.1.2 Cálculo del tiempo de espera de la zona de espera

El tiempo de espera para cruzar,  $Q_{t(p,s)}$ , representa el intervalo de tiempo que debe esperar el peatón para poder realizar el cruce pertinente. Las ecuaciones ( 25 ) y ( 26 ) presentadas

a continuación consideran que los peatones que llegan a dicha zona lo hacen de manera uniforme durante la duración del ciclo.

$$Q_{t(p,s)} = \frac{N_{do}(C - g_{walk})^2}{2C} \quad (25)$$

$$N_{d(p,s)} = \frac{V_{d(p,s)}}{3600} C \quad (26)$$

Donde:

$Q_{t(p,s)}$ : tiempo total que los peatones esperan para cruzar la vía en un ciclo, (seg).

$N_{do(p,s)}$ : número de peatones que arriban a la esquina cada ciclo para cruzar, (pers/seg).

$C$ : Longitud del ciclo semafórico, (seg).

$g_{walk}$ : Tiempo permitido de caminata de los peatones, (seg).

$V_{d(p,s)}$ : Flujo de peatones que arriban a la esquina en una hora para cruzar, (pers/hora).

Estos cálculos se realizan tanto para la vía principal, (p), como para la vía secundaria, (s), de manera automatizada, considerando los datos ingresados con anterioridad. Además, se repite el cálculo para cada esquina.

### 3.2.3.1.3 Cálculo del tiempo espacio de circulación

El tiempo espacio de circulación,  $TS_c$ , equivale al tiempo espacio permitido menos el tiempo espacio ocupada por los peatones durante esperan para poder realizar el cruce. En la ecuación ( 27 ) se utiliza el valor de 5 ft<sup>2</sup>/pers, siendo este valor el espacio que suele utilizar un peatón promedio.

$$TS_c = TS_{corner} - [5.0(Q_{tp} + Q_{ts})] \quad (27)$$

Donde:

$TS_c$ : Tiempo espacio permitido para la circulación de los peatones (ft<sup>2</sup>-seg).

$TS_{corner}$ : Tiempo espacio permitido en la esquina (ft<sup>2</sup>-seg).

$Q_{t(p,s)}$ : Tiempo total que los peatones esperan para cruzar la vía en un ciclo (seg).

De la misma manera estos datos son realizados de manera mecánica, para cada una de las esquinas.

#### 3.2.3.1.4 Cálculo del área de circulación del peatón en la esquina

El área de circulación peatonal en la esquina,  $M_{corner}$ , se determina dividiendo el tiempo espacio permitido para la circulación de los peatones para el tiempo que los peatones utilizan para poder realizar el cruce de la vía. A continuación, se presentan las ecuaciones ( 28 ) y ( 29 ) utilizadas.

$$M_{corner} = \frac{TS_c}{4.0N_{tot}} \quad (28)$$

$$N_{tot} = \frac{V_{pi} + V_{po} + V_{si} + V_{so} + V_{a,b}}{3600} C \quad (29)$$

Donde:

$M_{corner}$ : Superficie de circulación de cada persona (ft<sup>2</sup>/pers).

$TS_c$ : Tiempo espacio permitido para la circulación de los peatones (ft<sup>2</sup>-seg).

$N_{tot}$ : Número de peatones que llegan a la esquina durante cada ciclo semafórico (pers).

$V_{s(i,o)}$ : Flujo peatonal que llega a la esquina después de cruzar la vía secundaria (pers/hora).

$V_{p(i,o)}$ : Flujo peatonal que llega a la esquina después de cruzar la vía principal (pers/hora).

$V_{(a,b)}$ : Flujo peatonal que utiliza el cruce en ambas direcciones, a y b, (pers/hora).

El valor de la superficie de circulación con la que cuenta cada peatón se obtiene de manera automática gracias a que estos valores son realizados por el algoritmo. Así mismo, se realizan los cálculos para cada una de las esquinas.

El resultado de este proceso es caracterizado con la Tabla 4 obtenida de (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) para conocer la situación con la que cuentan los peatones al momento de esperar poder realizar el cruce en cada esquina.

#### 3.2.3.2 Determinación del espacio de circulación en el cruce peatonal

Se utiliza el procedimiento descrito por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) para evaluar el estado de circulación de los peatones mientras utilizan el cruce peatonal. En intersecciones tipo cruz normalmente se cuenta con cuatro cruces peatonales. Los cálculos se realizan para cada uno de estos cruces. Se presenta a continuación los procesos realizados para llegar a conocer los valores antes mencionados, los mismos que están automatizados por el algoritmo para intersecciones tipo cruz y tipo T.

### 3.2.3.2.1 Cálculo del tiempo-espacio disponible

Para conocer el tiempo-espacio disponible,  $TS_{cw}$ , se procede con el cálculo que hace referencia a la superficie otorgada por cada cruce peatonal y la velocidad de caminata de los peatones. Los mismos valores que fueron ingresados en la sección 3.2.1.3, se presenta la ecuación ( 30 ) utilizada.

$$TS_{cw} = L_d W_d g_{walk} \quad ( 30 )$$

Donde:

$TS_{cw}$ : Tiempo espacio permitido en el cruce peatonal (ft2-seg).

$L_d$ : Largo el cruce peatonal (ft).

$W_d$ : Ancho del cruce peatonal (ft).

$g_{walk}$ : Tiempo permitido de caminata de los peatones, (seg).

Los cálculos son realizados para cada uno de los cruces peatonales que existen en la intersección en estudio.

### 3.2.3.2.2 Cálculo del tiempo-espacio efectivo disponible

El tiempo espacio permitido en el cruce peatonal es ajustado debido a los vehículos que utilizan la intersección y pasan por el cruce peatonal al mismo tiempo que el peatón realiza el cruce. Este cálculo se realiza debido a que el vehículo utiliza una superficie del cruce. Se exhiben las ecuaciones ( 31 ), ( 32 ) y ( 33 ) requeridas para el cálculo:

$$TS_{cw}^* = TS_{cw} - TS_{tv} \quad ( 31 )$$

$$TS_{tv} = 40 N_{tv} W_d \quad ( 32 )$$

$$N_{tv} = \frac{V_{lt,perm} + V_{rt} - V_{rtor}}{3600} C \quad ( 33 )$$

Donde:

$TS_{cw}^*$ : Tiempo espacio efectivo permitido en el cruce peatonal (ft2-seg).

$TS_{cw}$ : Tiempo espacio permitido en el cruce peatonal (ft2-seg).

$TS_{tv}$ : Tiempo espacio ocupado por vehículos que giran hacia el cruce (ft2-seg).

$W_d$ : Ancho del cruce peatonal (ft).

$N_{tv}$ : Número de vehículos que utilizan el cruce peatonal durante el cruce de peatones (veh).

$V_{lt,perm}$ : Volumen vehicular que gira hacia la izquierda de manera permitida (veh/h).

$V_{rt}$ : Volumen vehicular que gira a la derecha (veh/h).

$V_{rtor}$ : Volumen vehicular que gira a la derecha en intervalo de rojo (veh/h).

$C$ : Longitud del ciclo semafórico, (seg).

Este cálculo se realiza de manera mecánica para cada cruce peatonal, para ello se considera los datos ingresados en la sección 3.2.1.3. El valor de 40 de la ecuación ( 32 ) representa una constante de barrido de la mayoría de vehículos (8ft).

### 3.2.3.2.3 Cálculo del tiempo de servicio de peatones

El tiempo de servicio de peatones,  $t_{ps}$ , es conocido como el intervalo de tiempo con el que se cuenta desde que el primer peatón realiza el cruce hasta que el último lo termina de realizar. De esta manera se tiene en cuenta el tamaño del pelotón en el tiempo de servicio del cruce. Se cuenta con dos ecuaciones, para cruces con un ancho mayor a 10 ft (3,0 m) y para cruces con un ancho menor o igual a 10ft (3,0 m).

Si el ancho del cruce es mayor a 10 ft (3,0 m), se utiliza la ecuación ( 34 ).

$$t_{ps} = 3.2 + \frac{L_d}{S_p} + 2.7 \frac{N_{ped}}{W_d} \quad ( 34 )$$

Si el ancho del cruce es igual o menor a 10 ft (3,0 m), se utiliza la ecuación ( 35 ).

$$t_{ps(p,s)} = 3.2 + \frac{L_d}{S_p} + 0.27 N_{ped} \quad ( 35 )$$

Además, para conocer el número de peatones que esperan realizar el cruce se utiliza la ecuación ( 36 ):

$$N_{ped} = Nd(p,s) \frac{C - g_{walk}}{C} \quad ( 36 )$$

Donde:

$t_{ps(p,s)}$ : tiempo que toma a los peatones realizar el cruce de la vía (seg).

$L_d$ : Largo el cruce peatonal (ft).

$S_p$ : velocidad de los peatones (ft/seg).

$N_{ped}$ : número de peatones que esperan en la esquina poder cruzar (pers).

$W_d$ : Ancho del cruce peatonal (ft).

$N_{d(p,s)}$ : número de peatones que arriban a la esquina cada ciclo para cruzar (pers/seg).

$C$ : Longitud del ciclo semafórico, (seg).

$g_{walk}$ : Tiempo permitido de caminata de los peatones, (seg).

Los cálculos se realizan de manera automática considerando los datos ingresados en la pág. 44 para cada uno de los cruces peatonales.

#### 3.2.3.2.4 Cálculo del tiempo de ocupación del paso de peatones

El tiempo de ocupación del paso peatonal en el cruce,  $T_{occ}$ , es el producto del tiempo con el que cuenta el peatón para realizar el cruce y del número de peatones que utilizan el cruce durante un ciclo semafórico. Para ello se utilizó las ecuaciones ( 37 ) y ( 38 ).

$$T_{occ} = t_{psp}N_{dp} + t_{pss}N_{ds} \quad ( 37 )$$

$$N_{d(p,s)} = \frac{V_{d(p,s)}}{3600} C \quad ( 38 )$$

Donde:

$T_{occ}$ : tiempo espacio de ocupación del cruce peatonal (pers-seg).

$t_{ps(p,s)}$ : tiempo que toma a los peatones realizar el cruce de la vía (seg).

$N_{d(p,s)}$ : número de peatones que arriban a la esquina cada ciclo para cruzar (pers/seg).

$V_{d(p,s)}$ : flujo de peatones que arriban a la esquina en una hora para cruzar (pers/hora).

$C$ : Longitud del ciclo semafórico, (seg).

Los cálculos son realizados de manera mecánica considerando los datos obtenidos anteriormente. Este proceso se repite para cada cruce peatonal.

#### 3.2.3.2.5 Cálculo del área de circulación del paso peatonal

El espacio de circulación,  $M_{cw}$ , con el que cuenta cada peatón es determinado dividiendo el tiempo-espacio permitido para el tiempo de ocupación del cruce peatonal, como se muestra en la ecuación ( 39 ).

$$M_{cw} = \frac{TS_{cw}^*}{T_{occ}} \quad (39)$$

Donde:

$M_{cw}$ : superficie de circulación en el cruce peatonal para cada persona (ft<sup>2</sup>/pers).

$TS_{cw}^*$ : tiempo espacio efectivo permitido en el cruce peatonal (ft<sup>2</sup>-seg).

$T_{occ}$ : tiempo espacio de ocupación del cruce peatonal (pers-seg).

Los cálculos se realizan de manera automática para cada uno de los cruces peatonales que existen en la intersección en estudio. De la misma manera que en la sección 3.2.3.1 el resultado de este proceso es comparado con la Tabla 4, para determinar la situación con la que cuentan los peatones al momento de esperar poder realizar el cruce en cada esquina.

### 3.2.3.3 Determinación del tiempo de demora del peatón

El tiempo que el peatón debe esperar para poder cruzar tanto la vía principal, como la secundaria, es conocido como la demora de este. Para ello (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) presenta la ecuación ( 40 ).

$$d_p = \frac{(C - g_{walk})^2}{2C} \quad (40)$$

Donde:

$d_p$ : demora del peatón (seg/pers).

$C$ : Longitud del ciclo semafórico, (seg).

$g_{walk}$ : Tiempo permitido de caminata de los peatones, (seg).

La demora que se obtiene para cada cruce es similar para los dos lados del cruce peatonal. El proceso es mecánico y este utiliza los valores que son obtenidos anteriormente.

“Los peatones se impacientan si estos deben de esperar más de 30 seg/pers para poder realizar el cruce de la vía, lo que llevaría a que exista un descontento con la configuración semafórica. En contraste los peatones se sienten complacidos si la demora es menor que 10 seg/pers” (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).



### 3.2.3.4 Determinación del nivel de servicio peatonal para la intersección

Se procede a determinar el funcionamiento de los cruces peatonales, el mismo que se repite para cada uno de ellos. En este procedimiento se utiliza la Tabla 5 para presentar el actual funcionamiento de los cruces peatonales.

Para obtener este valor, se hace uso de factores como; factor de ajuste de la sección de cruce, factor de ajuste del volumen de vehículos motorizados, factor de ajuste de la velocidad de los vehículos motorizados, factor de ajuste por demora de peatones.

Las ecuaciones ( 41 ), ( 42 ), ( 43 ), ( 44 ), ( 45 ) y ( 46 ) utilizadas, son presentadas a continuación:

$$I_{p,int} = 0.5997 + F_w + F_v + F_s + F_{delay} \quad (41)$$

$$F_w = 0.681 (N_d)^{0.514} \quad (42)$$

$$F_v = 0.00569 \left( \frac{V_{rtor} + V_{lt,perm}}{4} \right) - N_{rtc} (0.0027n_{15} - 0.1946) \quad (43)$$

$$F_s = 0.00013n_{15}S_{85} \quad (44)$$

$$F_{delay} = 0.0401 \ln(d_{p,d}) \quad (45)$$

$$n_{15} = \frac{0.25}{N_d} \sum_{i \in md} V_i \quad (46)$$

Donde:

$I_{p,int}$ : nivel de servicio peatonal para la intersección.

$F_w$ : factor de ajuste de la sección de cruce.

$F_v$ : factor de ajuste del volumen de vehículos motorizados.

$F_s$ : factor de ajuste de la velocidad de los vehículos motorizados.

$F_{delay}$ : factor de ajuste por demora de peatones.

$N_d$ : número de carriles que cruza el peatón.

$N_{rtc}$ : número de islas para canalizar giro a la derecha.

$n_{15}$ : cantidad de vehículos que viajan en la vía durante 15 minutos (veh/carril).

$S_{85}$ : velocidad de aproximación de la vía principal (percentil 85), (mi/hora).

$d_{p,d}$ : demora del peatón (seg/pers).

$V_i$ : flujo de demanda por el carril  $i$  (veh/hor)

$md$ : conjunto de todos los movimientos de automóviles que usan el cruce peatonal.

El nivel de servicio obtenido para cada cruce peatonal es aplicable en ambas direcciones. Los cálculos pertinentes son mecánicos.

### 3.2.3.5 Determinación del nivel de servicio peatonal

Este proceso se repite para cada cruce peatonal, comparando los resultados obtenidos en la sección 3.2.3.3 y 3.2.3.4 con la Tabla 5 presentada nuevamente en esta sección y se obtiene el nivel de servicio peatonal de cada cruce. Este proceso es realizado de manera automática.

LOS	LOS Score
A	$\leq 2.00$
B	$> 2.00 - 2.75$
C	$> 2.75 - 3.50$
D	$> 3.50 - 4.25$
E	$> 4.25 - 5.00$
F	$> 5.00$

*Tabla 9 Criterio del nivel de servicio peatonal (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) pág. 18-7*

## 3.3 Estado optimizado

Se determina el estado optimizado de la intersección utilizando el método de estimación rápida presentada por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) y utilizando un cálculo determinístico se obtiene el intervalo de verde que otorga las menores demoras a la intersección. Para ello se utilizan los datos ingresados en el estado actual y además se ingresa los datos expresados en la sección 0.

### 3.3.1 Estado optimizado demoras y nivel de servicio

Para optimizar la intersección a analizar, se configura el modelo de cálculo para obtener la fase recomendada según (Roess, Prassas, & McShane, 2011). Además de esta recomendación, se debe seleccionar el intervalo de ciclo mínimo y máximo entre el cual se buscará el más óptimo, el tiempo de verde mínimo y los tiempos de ámbar y todo rojo establecidos.

Para tener un valor de ciclo optimo inicial, se determina el ciclo de Webber. Dicho cálculo se detalla a continuación.

### 3.3.1.1 Cálculo de Webber

Se parte de interpretar el tipo de giro izquierdo establecido para cada aproximación. Debido a que si el giro es permitido o permitido-protegido, existe tiempo perdido por fase,  $t_L$ . Dicha variable existe para cada fase y es igual a 4 seg, en caso de cumplir la condición de tipo de giro.

Se selecciona el volumen de fase crítico,  $CV$ , para cada fase. Dicha variable corresponde el máximo volumen vehicular ajustado por fase. Para determinar este valor el modelo busca los movimientos permitidos bajo el mismo verde actuante y entre las opciones selecciona el máximo volumen vehicular.

El ciclo optimo según Webber se determina con la ecuación ( 47 ). Donde el  $CS$ , corresponde a la suma crítica, misma que es igual a la suma de los volúmenes de fase críticos, la variable  $L$ , es la suma de los tiempos perdidos por fase y  $RS$ , corresponde al flujo vehicular referencial calculado con la ecuación ( 15 ).

$$C_w = \frac{L}{1 - \frac{CS}{RS}} \quad (47)$$

Donde:

$CS$ : Suma crítica. Corresponde a la suma de los volúmenes de las fases críticas.

$L$ : Suma de tiempos perdidos por fase

$RS$ : Flujo vehicular referencial, explicado en la pág. 52.

### 3.3.1.2 Selección de intervalo de ciclo, verde mínimo, ámbar y todo rojo

Para la optimización semafórica de la intersección se establece un tiempo de ciclo mínimo,  $C_{min}$ , tiempo de ciclo máximo,  $C_{max}$ , intervalo de verde mínimo  $V_{min}$ , intervalo de tiempo para ámbar y un intervalo de tiempo de todo rojo.

### 3.3.1.3 Selección de configuración semafórica recomendada

Se utilizan las recomendaciones de giro izquierdo presentadas por (Roess, Prassas, & McShane, 2011), explicadas con anterioridad en el capítulo 2.5.3. Bajo estas recomendaciones se establece el criterio para el giro izquierdo de cada aproximación.

### **3.3.1.4 Cálculos de optimización**

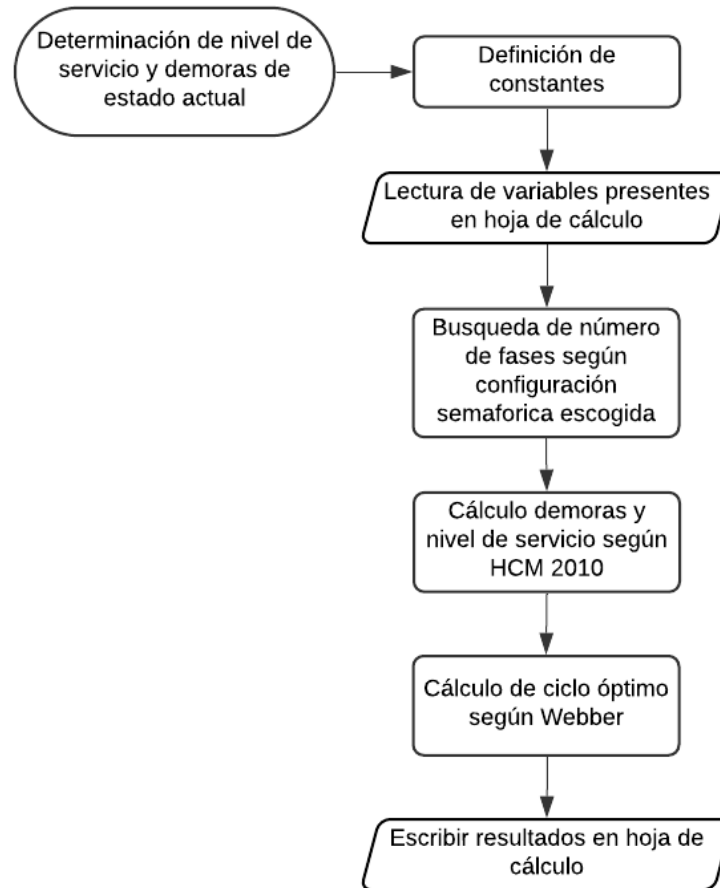
Debido a que las demoras de una intersección son proporcionales a los intervalos de tiempo de verde de cada aproximación, se realiza un proceso determinístico para obtener los menores tiempos de demoras para toda la intersección.

Este proceso se realiza analizando todas las posibles combinaciones de los intervalos de verde para cada una de las fases del ciclo semafórico. Para cada combinación se realiza los procesos descritos en la sección 2.5.4.1, en donde gracias al método de estimación rápida presentado por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) se determina la demora de la intersección para cada posible combinación.

El modelo funciona debido a que este guarda los intervalos de tiempo de verde que dan como resultado la menor demora posible. En el caso de que el algoritmo encuentre una nueva combinación con menores demoras, estas serán guardadas borrando las anteriores. Culminando el proceso con el cálculo del nivel de servicio de la intersección, presentando así las demoras de cada aproximación, nivel de servicio de cada aproximación, demoras de la intersección, nivel de servicio de la intersección y los intervalos de tiempo para cada fase. Además, se determina el nivel de servicio peatonal de la intersección con estos nuevos intervalos de tiempo.

## **3.4 Algoritmo**

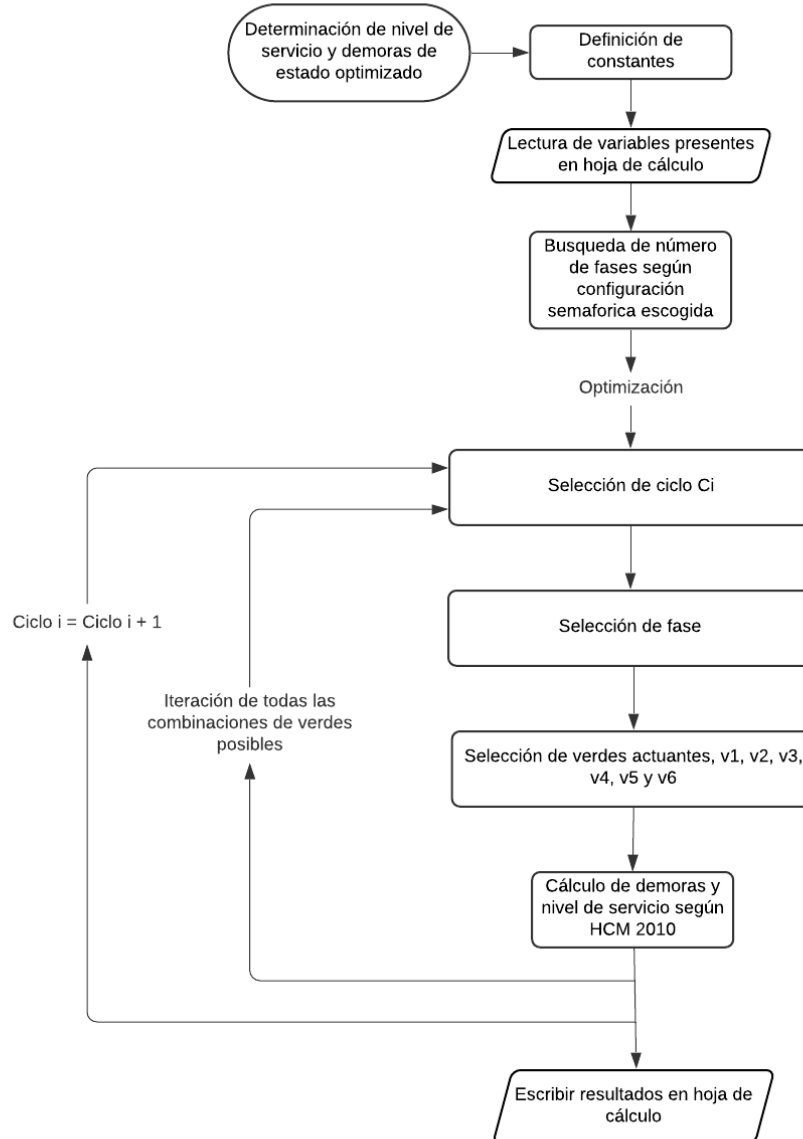
Se presenta en el Esquema 6 el algoritmo para determinar demoras y nivel de servicio de estado actual. Dicho algoritmo se implementó en el software Excel mediante el lenguaje de programación Visual Basic. Una vez implementado el modelo de cálculo, este se utilizó para realizar los cálculos de 16 intersecciones seleccionadas de la base de datos de partida.



*Esquema 6 Algoritmo de cálculo de demoras y nivel de servicio para estado actual*

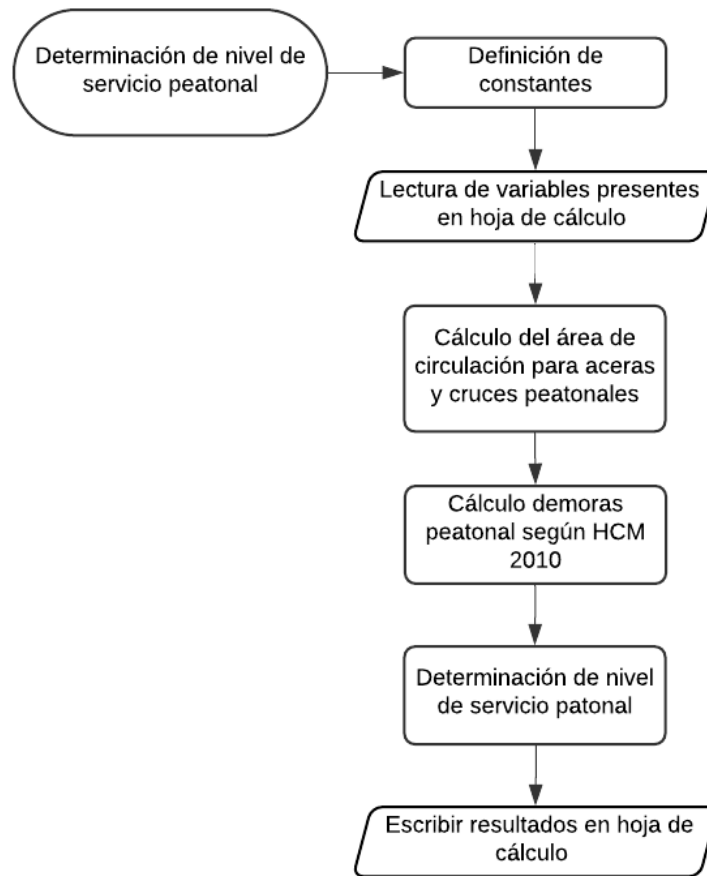
Se presenta en el Esquema 7 el algoritmo para optimizar el ciclo semafórico de la intersección. La optimización se realiza de manera determinística, es decir se prueban todas las posibilidades de combinaciones de ciclo semafórico con sus respectivos verdes actuantes.

Dicho algoritmo se implementó en el software Excel mediante el lenguaje de programación Visual Basic. Una vez implementado el modelo de cálculo, este se utilizó para realizar los cálculos de 16 intersecciones seleccionadas de la base de datos de partida.



*Esquema 7 Algoritmo de optimización vehicular de intersecciones semaforizadas*

El cálculo de caracterización de espacio peatonal y nivel de servicio del mismo se basa en el algoritmo presentado en el Esquema 8. Dicho esquema se utiliza tanto para el estado actual de la intersección como para el optimizado.



*Esquema 8 Algoritmo de caracterización de espacio peatonal y nivel de servicio del mismo*

### 3.5 Validación del modelo de optimización, utilizando software Tritone

El modelo de optimización del presente trabajo se valida comparando al mismo con un software existente en el mercado, conocido como Tritone. Este es de origen italiano realizado en (University of Calabria, 2018). Para la validación del modelo de optimización se usó la herramienta de microsimulación de intersecciones semaforizadas incluida en el programa.

A continuación, se detalla los pasos realizados para realizar la microsimulación de cada intersección:

#### Creación de la intersección

Se utiliza la herramienta “nodos” para insertar el inicio y fin de cada aproximación, tomando en cuenta de presentar una intersección semejante a la realidad. Entre cada nodo, se coloca

el número de carriles que existe en cada sentido y la saturación de cada vía. Además, se ingresa la velocidad y la longitud de cada vía.

### Ingreso de flujos vehiculares

Conociendo los flujos vehiculares que existen en cada intersección, se colocó el flujo máximo que existe entre un intervalo de 0 a 3600 segundo. Este proceso se repite para cada nodo.

### Ingreso del sistema de semáforos

Utilizando la opción “semáforos” se coloca el tiempo de verde, ámbar y rojo que existe en cada carril de la intersección. Al ser este el único proceso que varía entre el estado actual y el optimizado, es necesario contar con dos archivos para el análisis.

### Corrida de la microsimulación

Una vez ingresado las características de la intersección, además del flujo vehicular y ciclo semafórico se procede a realizar la microsimulación con la configuración mostrada en la Tabla 10.

Intervalos de muestra	Disminuya simulación	Modelo de auto-seguimiento a utilizar
1	75	Giofré Avanzato
Tipo de asignación	Modelo de cambio de carril a utilizar	Modelo de adelantamiento
Exponential	Giofre	Giofre 2016

*Tabla 10 Configuración para la simulación en Tritone*

Estos procesos son realizados para todas las intersecciones. Llevando a cabo la validación del modelo comparando los resultados de las demoras que se obtienen en todas las aproximaciones y la demora obtenida en toda la intersección. Para ello cada intersección es ingresada en el software Tritone dos veces, en donde la primera cuenta con los intervalos de tiempo semafórico del estado actual, mientras que para la segunda se implementa los tiempos semafóricos optimizados. Mismos que se obtienen al hacer uso del modelo de optimización.

Una vez se realiza la corrida de la simulación para cada intersección, se obtiene como resultado las demoras que existen tanto en las aproximaciones como en la intersección, en unidades de segundos por vehículos. Posteriormente estas demoras son utilizadas para





conocer el nivel de servicio de la intersección, utilizando la Tabla 8 presentada por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).

Se culmina el proceso de validación analizando y comparando los resultados de demoras y nivel de servicio obtenidos por el modelo de optimización y por el software Tritone, este análisis es presentado con un mayor detalle en el capítulo de resultados.

## CAPÍTULO 4

### 4 CÁLCULOS

A pesar de que el modelo de optimización semafórico se utiliza en el análisis de 16 intersecciones, en el presente capítulo se presenta el uso del mismo en 1 intersección, siendo esta: Av. Ordoñez Lasso y Av. De los Cerezos. El proceso de análisis de las demás intersecciones llega a ser el similar y sus resultados se presentan en Capítulo 5 y además entre Anexo 8 y Anexo 23.

#### 4.1 Determinación de una muestra significativa de intersecciones

En el año 2014 se levantó la información vehicular y peatonal de 81 intersecciones, las mismas que fueron presentadas por (Aviles, 2015). Tomando este estudio realizado como base del trabajo de titulación.

De 81 intersecciones, 34 de ellas contaban con un sistema de semáforos, en donde solo 16 de las intersecciones son utilizadas para el desarrollo del modelo de optimización basado en (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010). Las otras 18 intersecciones semaforizadas no cuentan con la información requerida, para el correcto análisis vehicular ni peatonal. En la Figura 5, se presenta un resumen de las muestras válidas para el desarrollo del trabajo de titulación.

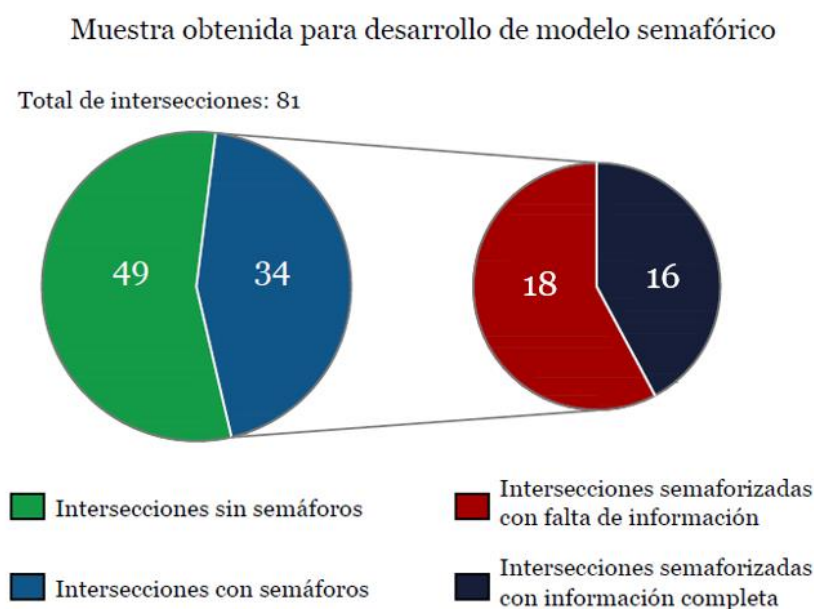


Figura 5 Muestra obtenida para desarrollo del modelo de optimización semafórico

En Tabla 11 se exhibe un resumen de las intersecciones analizadas. Donde se observan diferentes variaciones de intersecciones de 3 y 4 ramales que pueden servir tanto para ingreso de vehículos como para la salida de estos.

<b>Diferentes tipos de intersecciones semaforizadas</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Entradas</b>	<b>Salidas</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Cruz</b>	4	4	4
<b>Cruz</b>	4	3	1
<b>Cruz</b>	3	4	1
<b>Cruz</b>	3	3	3
<b>Cruz</b>	2	2	4
<b>T</b>	3	2	2
<b>T</b>	3	3	1
<b>Total</b>			16

*Tabla 11 Tipos de intersecciones analizadas*

## **4.2 Implementación de modelo de optimización semafórico**

Se presenta el ingreso de datos, cálculo y posterior optimización de la intersección en análisis.

### **4.2.1 Intersección modelo**

A continuación, se presenta los cálculos de una intersección semafórica de la ciudad de Cuenca, Ecuador. Para ello se parte de los respectivos datos de aforo del año 2014.

La intersección analizada es la Av. Ordoñez Lasso y Av. De los Cerezos, Ilustración 2, la selección de esta intersección se debe a las siguientes particularidades:

- Ubicada en una importante arteria vial de la ciudad de Cuenca.
- Intersección tipo cruz de 4 entradas y 4 salidas.
- Tipo de intersección más común de la ciudad de Cuenca.
- La fase semafórica cuenta con todos los movimientos permitidos.
- Presenta problemas con el flujo peatonal de la intersección.



*Ilustración 2 Intersección Av. Ordoñez Lasso y Av. De los Cerezos*

Sin embargo, se debe recalcar que el modelo de optimización es válido para intersecciones de 3 o 4 ramales con variación en su configuración; cantidad de entradas, cantidad de salidas, ausencia de flujos peatonales, movimientos permitidos o prohibidos, etc. De modo que, el proceso exhibido a continuación se repite para las demás intersecciones analizadas, estos análisis son presentados en la sección de resultados.

#### 4.2.2 Ingreso de datos de estado actual

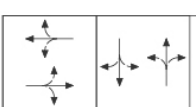
En el modelo elaborado se utilizan ventanas para el ingreso de datos. En donde se ingresa todos los datos detallados en la sección 3.2.1.1 de metodología. A continuación, desde la Figura 6, a la Figura 9, se presenta los datos ingresados para el análisis de demoras y nivel de servicio vehicular de la intersección de análisis.

INGRESO DE INFORMACIÓN GENERAL		X
INTERSECCIÓN	MT 45: Av. Ordoñez Lasso v Av. De los Cerezos	
FECHA DE ANÁLISIS	5 / marzo / 2015	
EMPRESA	A & P	
ANALISTA	Raúl Alberto Alvarez v Juan José Picón	
TIPO DE ÁREA	Otros	*
INTERSECCIÓN COORDINADA (SI/NO)	NO	*
DIRECCIÓN NORTE-SUR	Av. De los Cerezos	
DIRECCIÓN ESTE-OESTE	Av. Ordoñez Lasso	
FLUJO DE SATURACIÓN TEÓRICO (RECOMENDADO HCM 2010 PARA MÉTODO RÁPIDO DE 1530)	1530	*
INDISPENSABLES PARA ANÁLISIS *		
Software: Alvarez & Picón, 2020		
		ACEPTAR LIMPIAR

*Figura 6 Ingreso de información general de la intersección de análisis*

CONFIGURACIÓN DE FASE ACTUAL

ESQUEMA DE FASES



CODIG-OPC

0000-0

TIPO DE MOVIMIENTO

MOVIMIENTO PERMITIDO

MOVIMIENTO PROTEGIDO

GIRO IZQUIERDO

ESTE

OESTE

NORTE

SUR

Giro Izq. Permitido

Giro Izq. Permitido

Giro Izq. Permitido

Giro Izq. Permitido

VER FASES

ESCRIBIR FASE

CÓDIGO

OPCIÓN

0000

-

0

ACEPTAR

LIMPIAR

INDISPENSABLES PARA ANÁLISIS

Software: Alvarez & Picón, 2020

Figura 7 Configuración de fases presentes según tipo de giro izquierdo

En la Figura 7, se coloca la fase existente en la intersección. Esta fase se selecciona de la base de datos creada de 103 posibilidades. Dicha base de datos se adjunta en el Anexo 4. En la intersección encontramos fases en donde todos los movimientos de giro izquierdo son permitidos.

INGRESO DE TIEMPOS SEMAFÓRICOS

DATOS DE ENTRADA

VERDE 1 [sg]

42

VERDE 2 [sg]

27

VERDE 3 [sg]

VERDE 4 [sg]

VERDE 5 [sg]

VERDE 6 [sg]

TIEMPO DE AMBAR [sg]

2

TIEMPO DE TODO ROJO [sg]

1

ACEPTAR

LIMPIAR

Software: Alvarez & Picón, 2020

Fase

V1

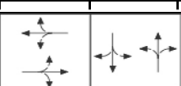
V2

V3

V4

V5

V6



MOVIMIENTO

MOVIMIENTO PROTEGIDO

Figura 8 Ingreso de tiempos semafóricos

Raúl Alberto Alvarez Unda.  
Juan José Picón Mosquera.

Página 76

Los tiempos semafóricos de la Figura 8, corresponden a las fases semafóricas establecidas en la intersección analizada y son de 42 y 27 seg, para el movimiento en dirección Norte-Sur (Av. De los Cerezos) y Este-Oeste (Av. Ordoñez Lasso), respectivamente. Los intervalos de verdes actuantes dependen específicamente del número de fases presentes en la intersección de análisis.

INGRESO DE DATOS DE AFORO

ORIGEN

ESTE

OESTE

NORTE

SUR

	Izq	RECTO	DER	Izq	RECTO	DER	Izq	RECTO	DER	Izq	RECTO	DER	
VELOCIDAD PERMITIDA [KM/H]	40			40			40			40			*
CARRILES POR SENTIDO	2			2			1			1			*
NÚMERO DE CARRILES POR MOV.	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	*
NÚMERO DE CARRILES EXCLUSIVOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	*
VOLUMEN [VEH/H]	60	380	65	17	545	104	76	288	50	126	201	97	*
FACTOR DE HORA DE MÁXIMA DEMANDA PHF	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	*
% VEH. PESADOS	10	10	10	13	13	13	5	5	5	7	7	7	
% DE GIRO IZQ FASE PERMIT- PROTE. SECCIÓN PERMITIDA [%]													
MANIOBRAS DE PARQUEO	0		0	0		0	0		0	0		0	
# DE ACCID. ANTES DE INGRESAR A LA INTERSECCIÓN [3 AÑOS]													
# DE ACCID. ENTRE GIRO IZQ Y FLUJO OPUESTO [3 AÑOS]													

INDISPENSABLES PARA ANÁLISIS \*

Software: Álvarez & Picón, 2020

ACEPTAR

LIMPIAR

Figura 9 Ingreso de características de la intersección y datos vehiculares aforados

Para un análisis de optimización de configuración semafórica para la intersección debe existir un carril exclusivo de giro izquierdo. Este no es el caso de la intersección analizada, por lo tanto, el resto de información sin datos presentados en la Figura 9, no afectan a los cálculos, debido que estos tienen como única función la de recomendar una fase con giros protegidos o no.

La Figura 10 y Figura 11 , presentan los datos adicionales que deben ingresarse para el análisis de caracterización de espacio para el peatón y el nivel de servicio del mismo.

INGRESO DE DATOS PARA ANÁLISIS PEATONAL H-1

**CANTIDAD DE CARRILES QUE CRUZA EL PEATÓN**

CA-N	2	CA-S	2
CA-E	4	CA-O	4

**EXISTENCIA DE ISLA PARA GIRO DERECHO**

GN	0	GS	0
GE	0	GO	0

SI=1 NO=0

**VELOCIDAD DE PEATÓN [m/s]**

1,2

Reco. HCM 2010 = 1.2m/s  
o [0.8 - 1.4] m/s

ACEPTAR

LIMPIAR

INDISPENSABLES PARA ANÁLISIS \*

Software: Alvarez & Picón, 2020

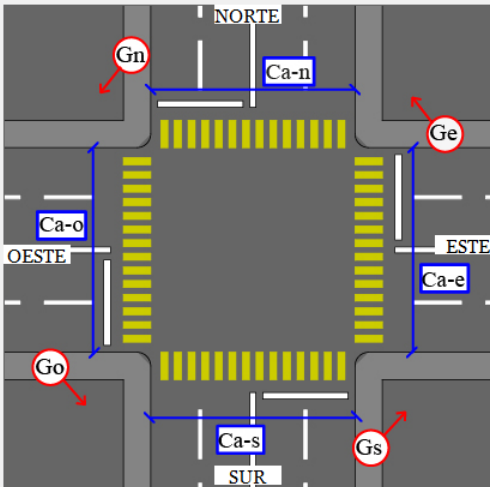


Figura 10 Ingreso de datos para análisis peatonal 1

INGRESO DE DATOS PARA ANÁLISIS PEATONAL H-2

**DATOS GEOMÉTRICOS**

**ANCHO DE VEREDAS**

1-N [M]	2	2-S [M]	2
2-N [M]	2	1-S [M]	0,5
2-E [M]	2	1-O [M]	0,5
1-E [M]	2	2-O [M]	2

**MEDIDA DE RADIOS EN ESQUINAS**

R1 [M]	3	R3 [M]	3
R2 [M]	3	R4 [M]	0,5

**ANCHO DE CRUCE**

A1 [M]	2	A3 [M]	2
A2 [M]	2	A4 [M]	2

**LONGITUD DE CRUCE**

L1 [M]	8	L3 [M]	15
L2 [M]	15	L4 [M]	8

**DATOS DE VOLUMEN**

**VOLUMENES DE PEATONES [1-12]**

V1 [PEAT/H]	13
V2 [PEAT/H]	16
V3 [PEAT/H]	20
V4 [PEAT/H]	21
V5 [PEAT/H]	12
V6 [PEAT/H]	11
V7 [PEAT/H]	13
V8 [PEAT/H]	8
V9 [PEAT/H]	
V10 [PEAT/H]	
V11 [PEAT/H]	
V12 [PEAT/H]	

ACEPTAR

LIMPIAR

INDISPENSABLES PARA ANÁLISIS \*

Software: Alvarez & Picón, 2020

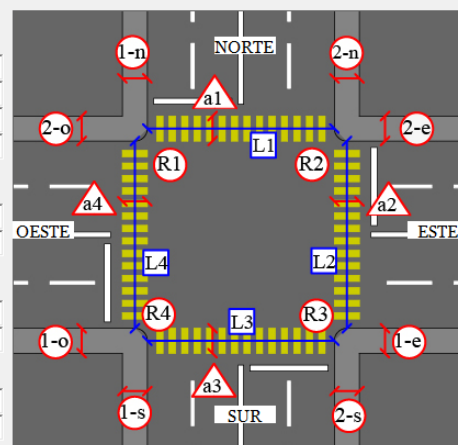


Figura 11 Ingreso de datos para análisis peatonal 2.

#### 4.2.3 Cálculos de estado actual

Ya ingresada la información mínima requerida para el análisis, se procede a realizar los cálculos necesarios para obtener los valores a utilizar para la determinación de demoras y nivel de servicio. Estos cálculos corresponden a los explicados en la sección 3.2.2 de metodología. En el modelo de optimización los cálculos se realizan mediante fórmulas utilizadas en la hoja de Excel, por lo cual, únicamente se presenta los resultados para cada uno de los cálculos realizados.

CÁLCULOS												
DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE CARRIL												
Origen	ESTE			OESTE			NORTE			SUR		
Movimiento	IZQ	RECTO	DER	IZQ	RECTO	DER	IZQ	RECTO	DER	IZQ	RECTO	DER
Tipo de carril	Carril Permitido		Carril Compartido	Carril Permitido		Carril Compartido	Carril Permitido		Carril Compartido	Carril Permitido		Carril Compartido
Volumen total (veh/h)	505			666			414			424		
Volumen en 15 min [veh/15min]	16	100	17	4	143	27	20	76	13	33	53	26
GIRO A LA DERECHA												
	Desde el Este		Desde el Oeste		Desde el Norte		Desde el Sur					
	Carril exclusivo Giro Der	Carril compartido	Carril exclusivo Giro Der	Carril compartido	Carril exclusivo Giro Der	Carril compartido	Carril exclusivo Giro Der	Carril compartido				
Vol. Giro Der $V_r$ (veh/h)	-	65	-	104	-	50	-	97				
Núm exclusivo de carriles Giro Der. Nrt (usa 1 en carril compartido)	0	1	0	1	0	1	0	1				
Factor de ajuste Giro Der $f_{rt}$	-	0,85	-	0,85	-	0,85	-	0,85				
Vol. por Giro Der $V_{RT}$	0	76	0	122	0	59	0	114				
GIRO A LA IZQUIERDA												
Vol. Giro Izq $V_l$ (veh/h)	60		17		76		126					
Vol. opuesto carril picipal $V_o$ (veh/h)	545		380		201		288					
Núme exclusivo de carriles Giro Izq. Nit	0		0		0		0					
Factor de ajuste Giro Izq $f_{lt}$	0,92		0,92		0,92		0,92					
Vol. por Giro Izq $V_{LT}$	Carril Permitido	0	Carril Permitido	0	Carril Permitido	0	Carril Permitido	0				

Figura 12 Ajuste de volumen vehicular para giro derecho y giro izquierdo

Se observa que el volumen por giro izquierdo tiene un valor de cero, esto se debe a que no existe un carril exclusivo de giro izquierdo, el ajuste por carril compartido se muestra en la Figura 13.



MOVIMIENTO RECTO												
	Giro Izq permitido	Giro Izq protegido	Giro Izq sin oposición	Giro Izq permitido	Giro Izq protegido	Giro Izq sin oposición	Giro Izq permitido	Giro Izq protegido	Giro Izq sin oposición	Giro Izq permitido	Giro Izq protegido	Giro Izq sin oposición
Vol. Mom Rect Vt (veh/h)	380	-	-	545	-	-	288	-	-	201	-	-
Núme de carriles Recto. NTH	2			2			1			1		
Factor de ajuste por parque fp	0,950			0,950			0,900			0,900		
Vol total de acercamiento Vtot (veh/h)	480	-	-	702	-	-	385	-	-	350	-	-
MOVIMIENTO RECTO CON CARRIL DE GIRO IZQUIERDO EXCLUSIVO												
Vol recto por carril VTH (veh/h/ln)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vol de carril crítico VCL (veh/h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MOVIMIENTO RECTO CON CARRIL DE GIRO IZQUIERDO COMPARTIDO												
Proporción de Giros Izq PLT	0,316	-	NO APLICA	0,062	-	NO APLICA	0,264	-	NO APLICA	0,627	-	NO APLICA
Factor de equivalencia EL1	1,75	NO APLICA	NO APLICA	1,50	NO APLICA	NO APLICA	1,27	NO APLICA	NO APLICA	1,38	NO APLICA	NO APLICA
Fact ajuste por Giro Izq compartido fDL	0,990	-	1	0,990	-	1	0,979	-	1	0,979	-	1
Vol recto por carril VTH (veh/h/ln)	243	-	-	355	-	-	393	-	-	358	-	-
Vol de carril crítico VCL (veh/h)	243	-	-	355	-	-	393	-	-	358	-	-

Figura 13 Ajuste de movimiento vehicular recto con carril de giro izquierdo compartido

Una vez ajustados los volúmenes vehiculares para cada movimiento se procede a seleccionar el grupo de carril existente en cada aproximación, con su respectivo número de carriles y volumen ajustado. Dicha información se calcula mecánicamente sumando los volúmenes ajustados y según los carriles ingresados en la Figura 9.

A continuación, en la Figura 14, se muestra los valores antes mencionados.

Origen	ESTE			OESTE			NORTE			SUR		
Carril	IZQ	CENTRO	DER	IZQ	CENTRO	DER	IZQ	CENTRO	DER	IZQ	CENTRO	DER
Grupo de carril	I & R	N/A	R & D	I & R	N/A	R & D	N/A	I, R & D	N/A	N/A	I, R & D	N/A
Numero de carriles por grupo	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
Vol ajustado del grupo de carril V (veh/h)	302,8	0,0	254,2	371,9	0,0	373,2	0,0	469,5	0,0	0,0	483,5	0,0

Figura 14 Cálculo de grupo de carril, número de carriles por grupo de carril y su respectivo volumen de flujo vehicular ajustado.

Posteriormente se procede a realizar los cálculos de demoras y nivel de servicio, mediante el algoritmo programado en lenguaje Visual Basic. Mismo que está basado en el Esquema 6, para calcular dichas variables. Los resultados de los cálculos realizados se presentan en la Figura 15.

CÁLCULO DE DEMORAS Y NIVELES DE SERVICIO VEHICULAR												1.7 REALIZAR CALCULOS	
CONTROL DE DEMORAS Y NIVEL DE SERVICIO													
Origen	ESTE			OESTE			NORTE			SUR			
Carril	IZQ	CENTRO	DER	IZQ	CENTRO	DER	IZQ	CENTRO	DER	IZQ	CENTRO	DER	
Grupo de carril	I & R	N/A	R & D	I & R	N/A	R & D	N/A	I, R & D	N/A	N/A	I, R & D	N/A	
Numero de carriles por grupo	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	
Vol ajustado del grupo de carril V (veh/h)	302,8	0,0	254,2	371,9	0,0	373,2	0,0	469,5	0,0	0,0	483,5	0,0	
Proporción de verde g/C	0,56		0,56	0,56		0,56		0,36			0,36		
Flujo de saturación del grupo de carril s (veh/h)	1453,50		1453,50	1453,50		1453,50		1453,50			1453,50		
Volumen/Capacidad X	0,37		0,31	0,46		0,46		0,90			0,92		
Capacidad del grupo de carril c (veh/h)	813,96		813,96	813,96		813,96		523,26			523,26		
Fact ajuste progresivo PF	1,00		1,00	1,00		1,00		1,00			1,00		
Demora 1 d1 (seg/veh)	9,17		8,80	9,76		9,77		22,69			23,02		
Demora 2 d2 (seg/veh)	1,30		1,00	1,85		1,86		20,73			24,41		
Demora d (seg/veh)	10,47		9,80	11,60		11,63		43,42			47,43		
Nivel de servicio	B		A	B		B		D			D		
Demora por acercamiento da (seg/veh)	10,17			11,61			43,42			47,43			
Nivel de servicio	B			B			D			D			
Flujo de aproximación Va (veh/h)	556,97			745,15			469,47			483,50			
Demora de la intersección di (seg/veh)	25,56												
[1] NIVEL DE SERVICIO VEH. DE LA INTERSECCIÓN		CÓDIGO		LONG. DE CICLO [sg]		CONFIGURACIÓN DE FASES							
C		0000 0		75		Verdes Tiempo [sg]	v1 42	v2 27					

Figura 15 Cálculo de demoras y nivel de servicio del estado actual de la Av. Ordoñez Lasso y Av. De los Cerezos

Como se observa en la Figura 15, la intersección de análisis tiene un nivel de servicio “C”, con una demora general de la intersección igual a 25.56 seg.

Se continúa el proceso de análisis caracterizando el espacio para el peatón y su respectivo nivel de servicio Figura 16. Dichos cálculos se realizan con el algoritmo exhibido en la sección 3.2.3.

NIVEL DE SERVICIO PEATONAL												
CRUCE	ESTE			OESTE			NORTE			SUR		
[2] Espacio para peatón en: [m2/p]	Acera 2-e	Acera 1-e	Cruce ESTE	Acera 1-o	Acera 2-o	Cruce OESTE	Acera 1-n	Acera 2-n	Cruce NORTE	Acera 2-s	Acera 1-s	Cruce SUR
	25,48	27,90	48,10	3,14	36,21	70,00	36,21	25,48	98,83	27,90	3,14	146,01
[3] Nivel de servicio peatonal	ESTE			OESTE			NORTE			SUR		
	2,48	B		2,58	B		2,02	B		2,18	B	

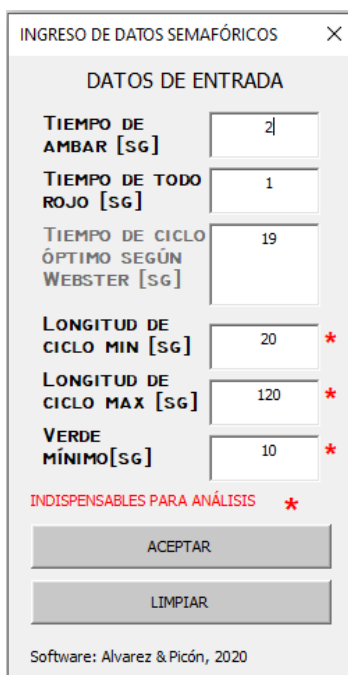
Figura 16 Caracterización de espacio por peatón y nivel de servicio del mismo.

#### 4.2.4 Ingreso de datos estado optimizado

Se continúa el proceso analizando el estado optimizado de la intersección, para ello se ingresa las condiciones del ciclo requeridas; tiempo de ámbar, tiempo de todo rojo, longitud de ciclo mínimo, longitud de ciclo máximo y verde mínimo. Además, se muestra el ciclo óptimo según Webber, el mismo que sirve como dato referencial que comúnmente esta cercano al verdadero valor óptimo.

Se recalca que el valor de verde mínimo que se ingresa, es un valor que ayuda al modelo de optimización a disminuir el número de iteraciones, pues empieza la búsqueda desde dicho valor. La reducción de iteraciones depende del valor de ciclo mínimo y máximo, ámbar, todo rojo, además depende de que si la intersección es desfasado o no y es una característica que el analista debe considerar para la selección del verde mínimo.

En la Figura 17, se muestran los datos de ingreso del ciclo para estado optimizado.



DATOS DE ENTRADA	
TIEMPO DE AMBAR [SG]	2
TIEMPO DE TODO ROJO [SG]	1
TIEMPO DE CICLO ÓPTIMO SEGÚN WEBSTER [SG]	19
LONGITUD DE CICLO MIN [SG]	20 *
LONGITUD DE CICLO MAX [SG]	120 *
VERDE MÍNIMO [SG]	10 *

INDISPENSABLES PARA ANÁLISIS \*

ACEPTAR

LIMPIAR

Software: Alvarez & Picón, 2020

*Figura 17 Datos semafóricos para estado optimizado*

La planificación de fases se realiza mecánicamente considerando las recomendaciones de (Roess, Prassas, & McShane, 2011), presentadas en la sección 3.3.1.3. Dicha planificación se muestra en la Figura 18, donde al no existir carril de giro izquierdo exclusivo se recomienda únicamente un giro permitido.

PLANIFICACION DE FASES				
Existe carril para Gir Izq exclusivo	NO	NO	NO	NO
R1	-	-	-	-
R2	-	-	-	-
R3	-	-	-	-
R4	-	-	-	-
Giro Recomendado	Giro Izq. Permitido	Giro Izq. Permitido	Giro Izq. Permitido	Giro Izq. Permitido

Figura 18 Planificación de fases estado optimizado

#### 4.2.5 Cálculos estado optimizado

Se realizan los cálculos de ajuste de volumen igual que en el estado actual, estos son presentados en la Figura 19 y Figura 20.

CÁLCULOS												
TRATAMIENTO GIRO A LA IZQUIERDA												
Origen	ESTE			OESTE			NORTE			SUR		
Movimiento	IZQ	RECTO	DER	IZQ	RECTO	DER	IZQ	RECTO	DER	IZQ	RECTO	DER
Tipo de carril	Carril Permitido		Carril Compartido	Carril Permitido		Carril Compartido	Carril Permitido		Carril Compartido	Carril Permitido		Carril Compartido
Volumen total (veh/h)	505,00			666,00			414,00			424,00		
Volumen en 15 min [veh/15min]	16	100	17	4	143	27	20	76	13	33	53	26
DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE CARRIL												
GIRO A LA DERECHA												
	Desde el Este			Desde el Oeste			Desde el Norte			Desde el Sur		
	Carril exclusivo Giro Der	Carril compartido		Carril exclusivo Giro Der	Carril compartido		Carril exclusivo Giro Der	Carril compartido		Carril exclusivo Giro Der	Carril compartido	
Vol. Giro Der Vr (veh/h)	-	65		-	104		-	50		-	97	
Núm exclusivo de carriles Giro Der. Nrt (usa 1 en carril compartido)	0,00	1		0,00	1		0,00	1		0,00	1	
Factor de ajuste Giro Der ftr	-	0,85		-	0,85		-	0,85		-	0,85	
Vol. por Giro Der VRT	0	76		0	122		0	59		0	114	
GIRO A LA IZQUIERDA												
Vol. Giro Izq Vi (veh/h)	60,00			17			76			126		
Vol. opuesto carril principal Vo (veh/h)	545,00			380,00			201,00			288,00		
Núm exclusivo de carriles Giro Izq. Nlt	0,00			0,00			0,00			0,00		
Factor de ajuste Giro Izq flt	0,92			0,92			0,92			0,92		
Vol. por Giro Izq VLT	Giro Izq. Permitido	0		Giro Izq. Permitido	0		Giro Izq. Permitido	0		Giro Izq. Permitido	0	

Figura 19 Ajuste de volumen vehicular para giro derecho y giro izquierdo para estado optimizado

MOVIMIENTO RECTO												
	Giro Izq permitido	Giro Izq protegido	Giro Izq sin oposición	Giro Izq permitido	Giro Izq protegido	Giro Izq sin oposición	Giro Izq permitido	Giro Izq protegido	Giro Izq sin oposición	Giro Izq permitido	Giro Izq protegido	Giro Izq sin oposición
Vol. Mom Rect Vt (veh/h)	380	-	-	545	-	-	288	-	-	201	-	-
Núme de carriles Recto. NTH	2,00			2,00			1,00			1,00		
Factor de ajuste por parque fp	0,950			0,950			0,900			0,900		
Vol total de acercamiento Vtot (veh/h)	480	-	-	702	-	-	385	-	-	350	-	-
MOVIMIENTO RECTO CON CARRIL DE GIRO IZQUIERDO EXCLUSIVO												
Vol recto por carril VTH (veh/h/ln)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vol de carril crítico VCL (veh/h)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MOVIMIENTO RECTO CON CARRIL DE GIRO IZQUIERDO COMPARTIDO												
Proporción de Giros Izq PLT	0,316	-	NO APLICA	0,062	-	NO APLICA	0,264	-	NO APLICA	0,627	-	NO APLICA
Factor de equivalencia EL1	2,17	NO APLICA	NO APLICA	1,86	NO APLICA	NO APLICA	1,58	NO APLICA	NO APLICA	1,71	NO APLICA	NO APLICA
Fact ajuste por Giro Izq compartido fDL	0,984	-	1	0,984	-	1	0,967	-	1	0,967	-	1
Vol recto por carril VTH (veh/h/ln)	244	-	-	357	-	-	398	-	-	362	-	-
Vol de carril crítico VCL (veh/h)	244	-	-	357	-	-	398	-	-	362	-	-

Figura 20 Ajuste de movimiento vehicular recto con carril de giro izquierdo compartido para estado optimizado

Una vez ajustados los volúmenes por movimiento se procede a determinar los grupos de carril con su número de carril y volumen ajustado. En la Figura 21, se exhiben los datos mencionados. Además, se realizan los cálculos de nivel de servicio y demoras según el algoritmo presentado en el Esquema 7 Algoritmo de optimización vehicular de intersecciones .

CÁLCULO DE DEMORAS Y NIVELES DE SERVICIO VEHICULAR												2.2 REALIZAR CÁLCULOS OPTIMIZADOS	
CONTROL DE DEMORAS Y NIVEL DE SERVICIO													
Origen	ESTE			OESTE			NORTE			SUR			
Grupo de carril	IZQ	RECTO	DER	IZQ	RECTO	DER	IZQ	RECTO	DER	IZQ	RECTO	DER	
Grupo de carril	I & R	N/A	R & D	I & R	N/A	R & D	N/A	I, R & D	N/A	N/A	I, R & D	N/A	
Numero de carriles por grupo	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	
Vol ajustado del grupo de carril V (veh/h)	304,3	0,0	255,7	374,1	0,0	375,4	0,0	474,4	0,0	0,0	488,0	0,0	
Proporción de verde g/C	0,38		0,38	0,38		0,38		0,44			0,44		
Flujo de saturación del grupo de carril s (veh/h)	1453,50		1453,50	1453,50		1453,50		1453,50			1453,50		
Volumen/Capacidad X	0,55		0,46	0,67		0,68		0,74			0,76		
Capacidad del grupo de carril c (veh/h)	555,75		555,75	555,75		555,75		641,25			641,25		
Fact ajuste progresivo PF	1,00		1,00	1,00		1,00		1,00			1,00		
Demora 1 d1 (seg/veh)	8,20		7,87	8,73		8,74		7,88			7,99		
Demora 2 d2 (seg/veh)	3,85		2,73	6,39		6,46		7,50			8,30		
Demora d (seg/veh)	12,05		10,60	15,12		15,20		15,38			16,29		
Nivel de servicio	B		B	B		B		B			B		
Demora por acercamiento da (seg/veh)	11,39			15,16			15,38			16,29			
Nivel de servicio	B			B			B			B			
Flujo de aproximación Va (veh/h)	559,97			749,54			474,42			488,00			
Demora de la intersección di (seg/veh)	14,52												
NIVEL DE SERVICIO VEH. DE LA INTERSECCIÓN		CÓDIGO		LONG. DE CICLO [sg]		CONFIGURACIÓN DE FASES							
B		0000 0		34		Verdes Tiempo [sg]	v1 13	v2 15					

Figura 21 Cálculo de demoras y nivel de servicio de la intersección en el estado optimizado

Como se observa en la Figura 21, el nivel de servicio de la Av. Ordoñez Lasso y Av. De los Cerezos, ahora cuenta con nivel “B” con un valor de demora igual a 14.52 seg para la intersección. Además, se observa que los valores obtenidos presentan movimientos de giro permitido en las aproximaciones.

La longitud de ciclo es igual a 34 seg y el intervalo de verde 1 correspondiente a la Av. Ordoñez Lasso siendo de 13 seg, mientras que el intervalo de verde 2 correspondiente a la Av. De los Cerezos es igual a 15 seg. Cabe recalcar que la optimización es realizada con el flujo vehicular de la hora de máxima demanda de la intersección.

Con la nueva configuración semafórica se realizan los cálculos de caracterización del espacio para el peatón y su respectivo nivel de servicio, como se muestra en la Figura 22.

NIVEL DE SERVICIO PEATONAL												2.3 NIVEL DE SERVICIO PEATONAL
CRUCE	ESTE			OESTE			NORTE			SUR		
Espacio para peatón en: [m2/p]	Acera 2-e	Acera 1-e	Cruce ESTE	Acera 1-o	Acera 2-o	Cruce OESTE	Acera 1-n	Acera 2-n	Cruce NORTE	Acera 2-s	Acera 1-s	Cruce SUR
	39,50	43,25	53,83	3,49	55,56	79,37	55,56	39,50	54,28	43,25	3,49	79,47
Nivel de servicio	ESTE			OESTE			NORTE			SUR		
	2,46	<b>B</b>		2,56	<b>B</b>		1,97	<b>A</b>		2,13	<b>B</b>	

Figura 22 Caracterización de espacio por peatón y nivel de servicio del mismo para estado optimizado

En Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7 se presentan las hojas de resumen de los resultados de las demoras y nivel de servicio, del estado actual y el optimizado de la intersección de la Av. Ordoñez Lasso y Av. De los Cerezos.

### 4.3 Validación de modelo elaborado mediante microsimulación por Tritone

El proceso de determinación de las demoras existentes en la intersección se realiza dos veces, en la primera se utiliza la configuración semafórica del estado actual, mientras que para la segunda se usa la del estado optimizado.

Considerando los datos ya ingresados para cada microsimulación mismos que son explicados a mayor detalle en el capítulo anterior, se procede a realizar la corrida de estos. En la Figura 23 se exhibe los parámetros para realizar la microsimulación, siendo los mismos para todas las intersecciones.



Figura 23 Parámetros de microsimulación del software Tritone

## CAPÍTULO 5

### 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados de los cálculos realizados por el modelo de optimización semafórico y por el software Tritone para cada una de las 16 intersecciones semaforizadas aforadas en el año 2014, además de comparaciones entre ambos programas.

#### 5.1 Elaboración de modelo de cálculo para obtener demoras y nivel de servicio de intersecciones semaforizadas

El modelo de cálculo del estado actual de intersecciones semaforizadas realizado se basa en la metodología de estimación rápida, presentada por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) con la cual, se determina las demoras y nivel de servicio vehicular existentes en cada grupo de carril, aproximación e intersección.

En Esquema 6 se presenta el algoritmo utilizado para realizar los cálculos requeridos. La implementación del algoritmo se realizó mediante el lenguaje Visual Basic.

##### 5.1.1 Resultado y validación de demoras y nivel de servicio en estado ACTUAL

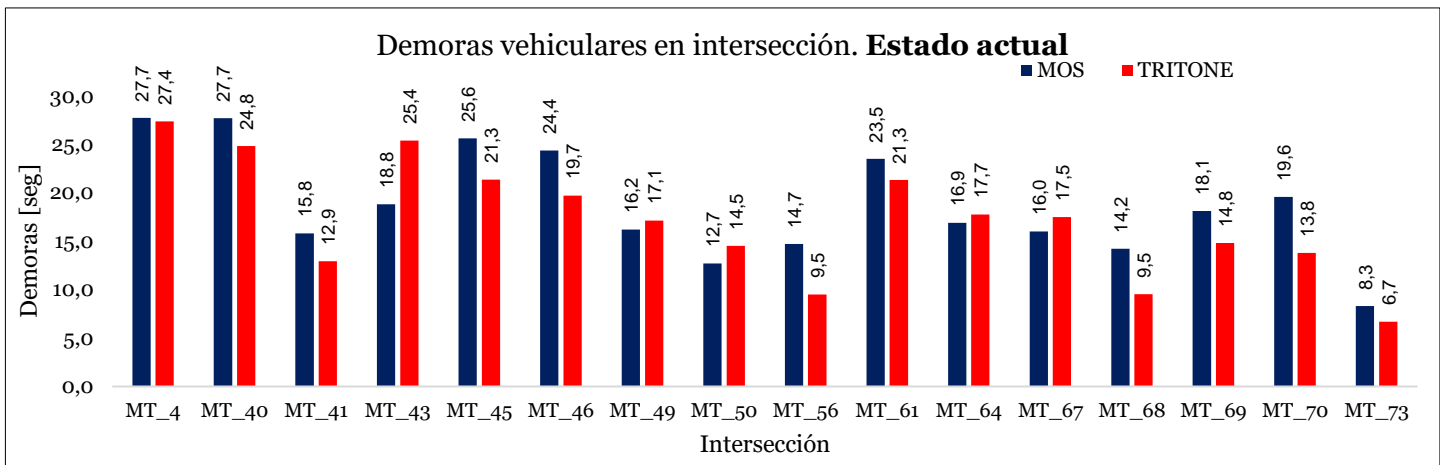
Utilizando el modelo de cálculo desarrollado, se obtienen los resultados de demoras de la intersección para cada una de las muestras analizadas. Además, mediante el uso de la microsimulación, realizada con el Software Tritone, se determina el valor de demora existente en cada muestra de análisis.

En la Tabla 12 y en la Gráfica 1, presentadas a continuación, se observan los resultados de demoras, obtenidos de cada intersección. Además, en dicha tabla se presenta también la diferencia absoluta del error existente entre ambos métodos.

Demoras vehiculares estado actual [seg]	Intersección	MT_4	MT_40	MT_41	MT_43	MT_45	MT_46	MT_49	MT_50	MT_56	MT_61	MT_64	MT_67	MT_68	MT_69	MT_70	MT_73
	MOS	27,7	27,7	15,8	18,8	25,6	24,35	16,2	12,7	14,7	23,5	16,9	16	14,2	18,1	19,55	8,3
	TRITONE	27,4	24,8	12,94	25,39	21,34	19,7	17,13	14,52	9,5	21,3	17,74	17,49	9,53	14,8	13,8	6,7
	Error [seg]	0,4	2,9	2,9	6,6	4,3	4,7	0,9	1,8	5,2	2,2	0,8	1,5	4,7	3,3	5,8	1,6

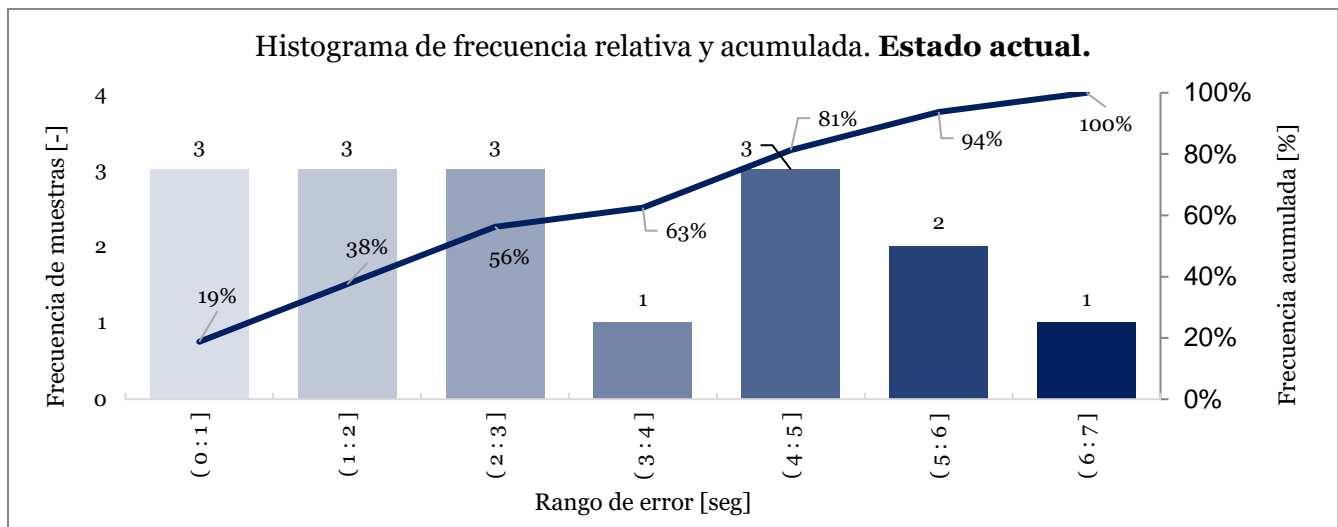
*Tabla 12 Demoras vehiculares del estado actual MOS vs Tritone*





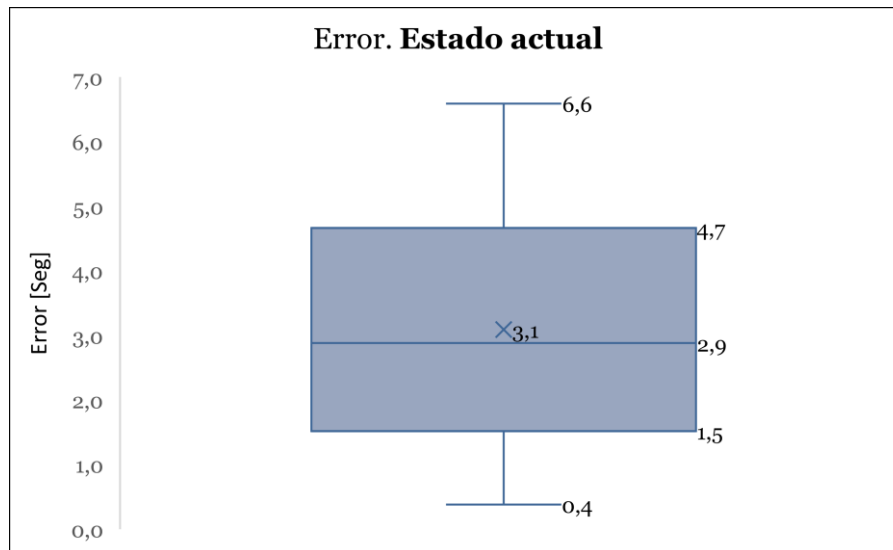
Gráfica 1 Demoras vehiculares del estado actual MOS vs Tritone

De los resultados observados anteriormente, se realiza un histograma de frecuencia relativa y acumulada Gráfica 2, donde se presenta el número de muestras comparándolas con el rango de error donde se encuentran las mismas. De esta manera se obtiene la mayor frecuencia de 9 intersecciones en un rango de error entre 0 y 3 seg. Además, en la misma gráfica, se exhibe la curva de frecuencia acumulada, donde se determina que el 94% de los datos se encuentra por debajo de un error de 6 seg.



Gráfica 2 Histograma de frecuencia relativa y acumulada. Estado actual.

Representando los errores calculados en un diagrama de caja, Gráfica 3. Se observa un rango intercuartil del error de 3.2 seg, comprendido entre el primer cuartil de 1.5 seg y el tercer cuartil de 4.7 seg. Además, se observa que la media y la mediana son similares con un valor de 3.1 seg y 2.9 seg, mostrando uniformidad en los datos. Se observa un valor mínimo y máximo de error de 0.4 seg y 6.6 seg, respectivamente.



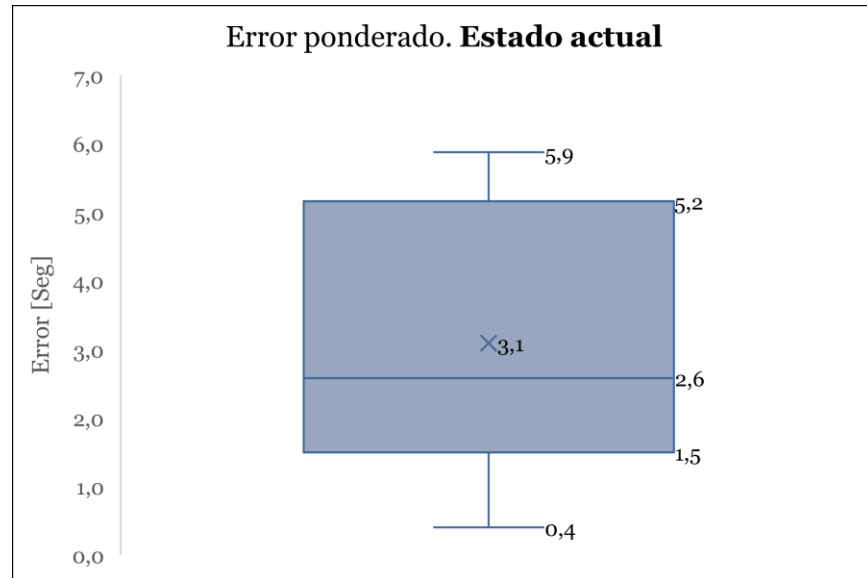
*Gráfica 3 Diagrama de caja del error del estado actual*

A continuación, se presenta el error ponderado de todas las intersecciones para el estado actual. El mismo se llega a obtener con el producto del error por un factor de ponderación, este factor de ponderación varía las duraciones de ciclo a un tiempo promedio de 66 seg. En Tabla 13 presentamos los factores, errores y errores ponderados de cada intersección.

Error ponderado del estado actual																
Valor promedio de ciclo semafórico [seg]								66								
Intersección	MT_4	MT_40	MT_41	MT_43	MT_45	MT_46	MT_49	MT_50	MT_56	MT_61	MT_64	MT_67	MT_68	MT_69	MT_70	MT_73
Duración de ciclo [seg]	62	79	68	78	75	60	78	50	58	64	55	77	59	68	69	48
Factor	1.06	0.83	0.96	0.84	0.87	1.09	0.84	1.31	1.13	1.02	1.19	0.85	1.11	0.96	0.95	1.36
Error [seg]	0.38	2.9	2.86	6.59	4.26	4.65	0.93	1.82	5.2	2.2	0.84	1.49	4.67	3.3	5.75	1.6
Error ponderado [seg]	0.40	2.40	2.75	5.53	3.72	5.08	0.78	2.38	5.87	2.25	1.00	1.27	5.18	3.18	5.46	2.18

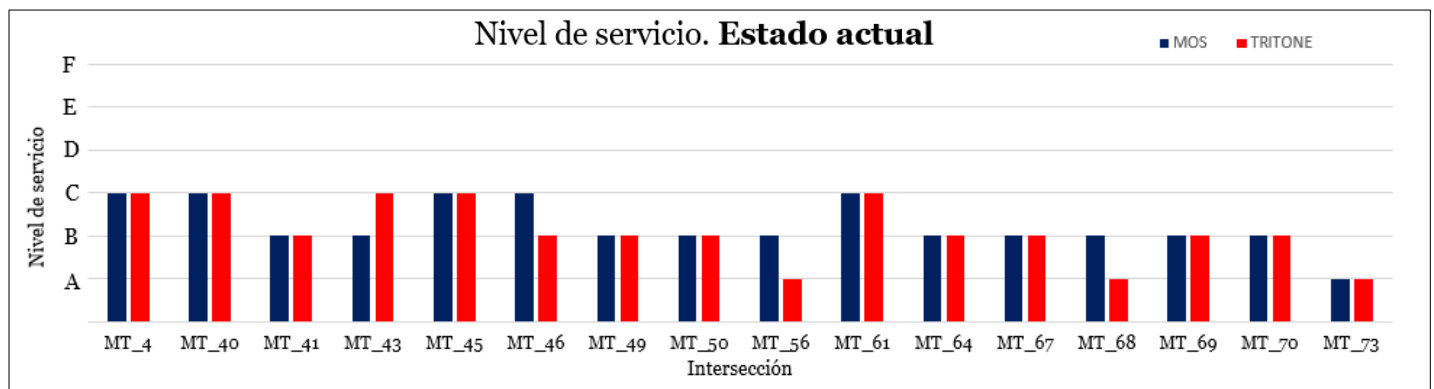
*Tabla 13 Error ponderado del estado actual*

En la Gráfica 4, se presenta los errores ponderados mediante el uso de un diagrama de caja, el valor de 3.7 seg representa el rango intercuartil. Los valores 1.5 seg y 5.2 seg simbolizan el primer y tercer cuartil respectivamente. Entre el valor de la media y la mediana encontramos una diferencia de 0.5 seg. Además, encontramos valores mínimos y máximos de 0.4 seg y 5.9 seg, respectivamente, contando de esta manera con valores que difieren en igual o menor valor que 5.5 seg de error ponderado.



Gráfica 4 Diagrama de caja del error ponderado del estado actual

Cada tiempo de demora obtenido en las distintas muestras, se caracteriza mediante el nivel de servicio vehicular. Este nivel de servicio se presenta en la Gráfica 5, donde se puede apreciar que 12 de 16 intersecciones, tienen el mismo nivel de servicio comparando el modelo de optimización y el software Tritone, mientras que en 4 el nivel de servicio varía en una categoría.



Gráfica 5 Nivel de servicio en estado actual MOS vs Tritone

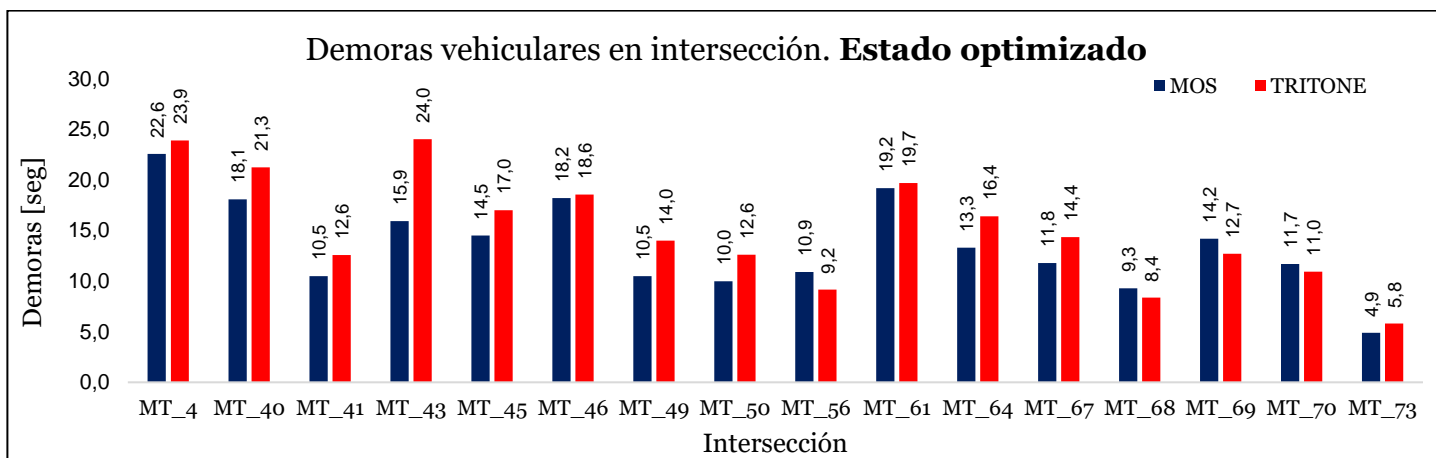
### 5.1.2 Resultado y validación de demoras y nivel de servicio en estado OPTIMIZADO

Aplicando el modelo de optimización se determinan los ciclos y fases semafóricos óptimos para cada intersección, siendo el parámetro de optimización la demora global de la intersección. Dicha optimización se valida utilizando microsimulación mediante el Software Tritone.

En la Tabla 14 y la Gráfica 6, se observan los resultados de las demoras obtenidos de cada intersección. Además, en dicha tabla se muestra la diferencia absoluta del error existente.

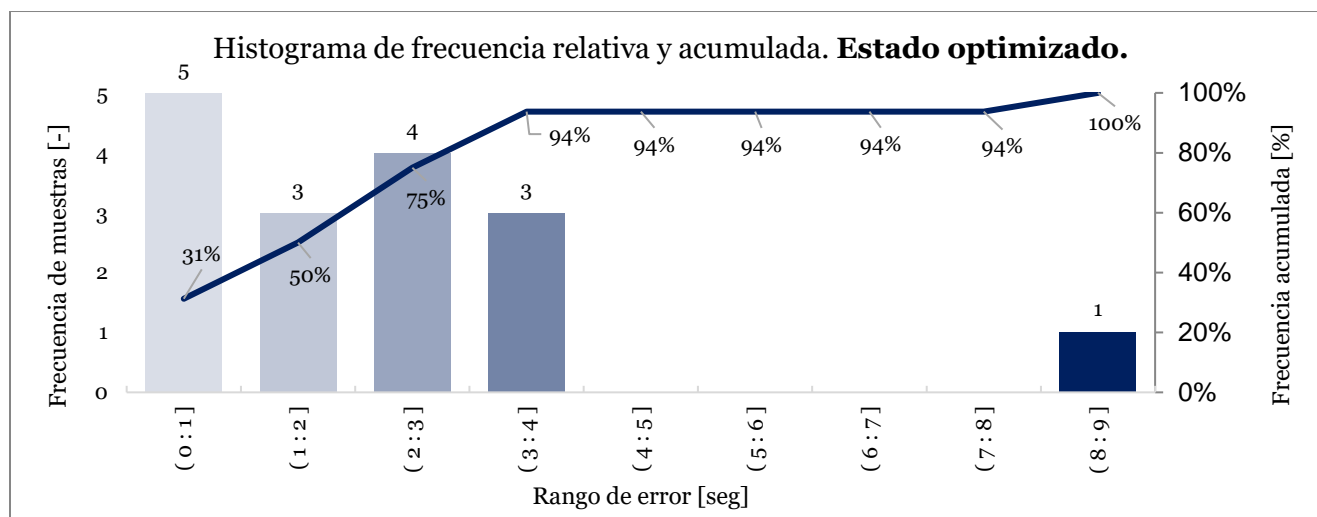
Demoras vehiculares estado optimizado [seg]	Intersección	MT_4	MT_40	MT_41	MT_43	MT_45	MT_46	MT_49	MT_50	MT_56	MT_61	MT_64	MT_67	MT_68	MT_69	MT_70	MT_73
MOS		22,6	18,1	10,5	15,9	14,5	18,2	10,5	10,0	10,9	19,2	13,3	11,8	9,3	14,2	11,7	4,9
TRITONE		23,9	21,3	12,6	24,0	17,0	18,6	14,0	12,6	9,2	19,7	16,4	14,4	8,4	12,7	11,0	5,8
Error [seg]		1,3	3,2	2,1	8,1	2,5	0,4	3,5	2,6	1,7	0,5	3,1	2,6	0,9	1,5	0,8	0,9

Tabla 14 Demoras vehiculares del estado optimizado MOS vs Tritone



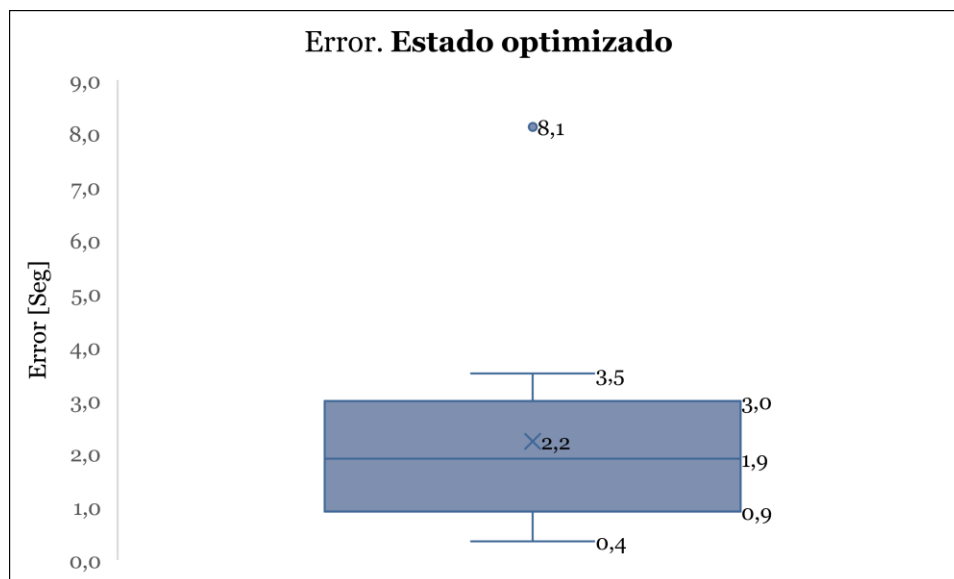
Gráfica 6 Demoras vehiculares del estado optimizado MOS vs Tritone

De los resultados observados anteriormente, se realiza un histograma de frecuencia relativa y acumulada en Gráfica 7, donde se grafica el número de muestras versus el rango de error donde se encuentran las mismas. Obteniendo la mayor frecuencia de 5 intersecciones en un rango de error entre 0 y 1 seg. Además, se presenta la curva de frecuencia acumulada, donde se observa que el 94 % de los datos se encuentra por debajo de un error de 4 seg.



Gráfica 7 Histograma de frecuencia relativa y acumulada. Estado optimizado.

Representando los errores mediante un diagrama de caja, Gráfica 8, se determina un rango intercuartil del error de 2.1 seg, comprendido entre el primer cuartil de 0.9 seg y el tercer cuartil de 3 seg. Además, se observa la mediana de 1.9 seg y la media de 2.2 seg. La diferencia entre dichos valores es de 0.3 seg, lo cual indica una uniformidad en los datos, la misma que se confirma observando la simetría del diagrama de caja. El valor mínimo presente es de 0.4 seg y el máximo valor dentro del rango es de 8.1 seg en el caso de una sola intersección, ya que la gran mayoría llega a un valor máximo de 3.5 seg.



Gráfica 8 Diagrama de caja del error del estado optimizado

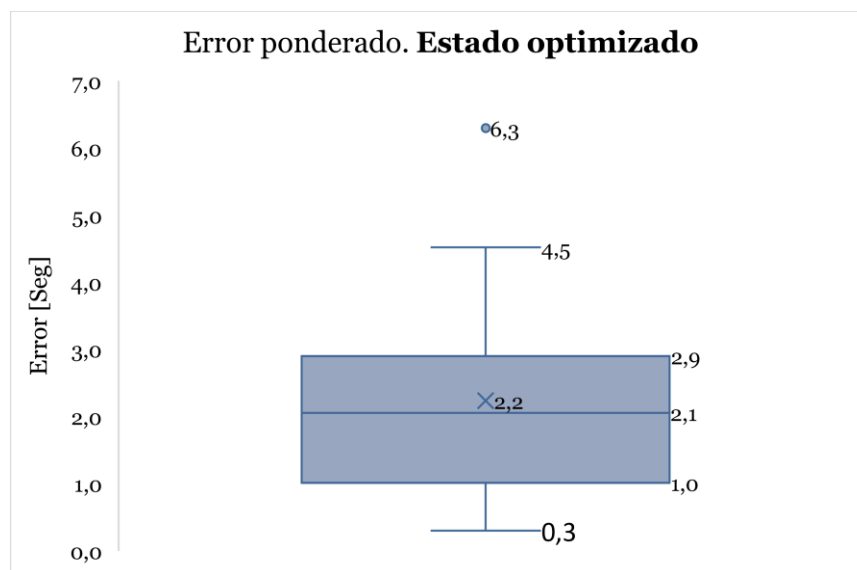
De la misma manera que en el estado actual, se presenta el error ponderado de todas las intersecciones para el estado optimizado. En la Tabla 15 presentamos los factores, errores y errores ponderados de cada intersección. Además, se presenta el tiempo promedio del ciclo semafórico para este estado siendo de 39 seg.

Error ponderado del estado optimizado																
Valor promedio de ciclo semafórico [seg]								39								
Intersección	MT_4	MT_40	MT_41	MT_43	MT_45	MT_46	MT_49	MT_50	MT_56	MT_61	MT_64	MT_67	MT_68	MT_69	MT_70	MT_73
Duración de ciclo [seg]	54	41	29	50	34	45	30	38	30	43	64	34	31	34	33	30
Factor	0.72	0.95	1.34	0.78	1.14	0.86	1.29	1.02	1.29	0.90	0.61	1.14	1.25	1.14	1.17	1.29
Error [seg]	1.34	3.16	2.07	8.12	2.5	0.35	3.5	2.62	1.73	0.5	3.1	2.56	0.93	1.5	0.75	0.9
Error ponderado [seg]	0.96	2.99	2.77	6.29	2.85	0.30	4.52	2.67	2.23	0.45	1.88	2.92	1.16	1.71	0.88	1.16

Tabla 15 Error ponderado del estado optimizado

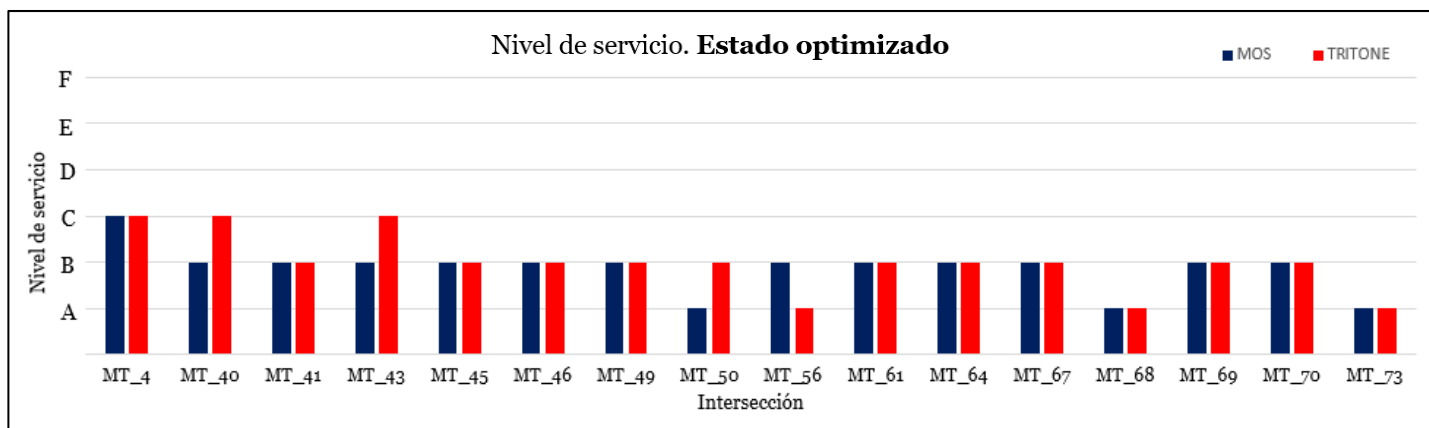
En la Gráfica 9 se exhiben los errores ponderados mediante el uso de un diagrama de caja, en donde el 1.9 seg representa el rango intercuartil. En el primer intercuartil encontramos un valor de 1 seg, mientras que en el tercer cuartil tenemos un valor de 2.9 seg. Los valores

de media y mediana son de 2.2 y 2.1 respectivamente, indicando uniformidad en los datos, con excepción del valor máximo de 6.3 seg. Contamos además con un valor mínimo de 0.3 seg y para 15 intersecciones un valor máximo de 4.5 seg.



Gráfica 9 Diagrama de caja del error ponderado del estado optimizado

El tiempo de demora obtenido en las distintas muestras, es caracterizado mediante el nivel de servicio vehicular, el cual se presenta en la Gráfica 10, donde se puede apreciar que 12 de 16 intersecciones, tienen el mismo nivel de servicio mientras que 4 varía en un nivel.

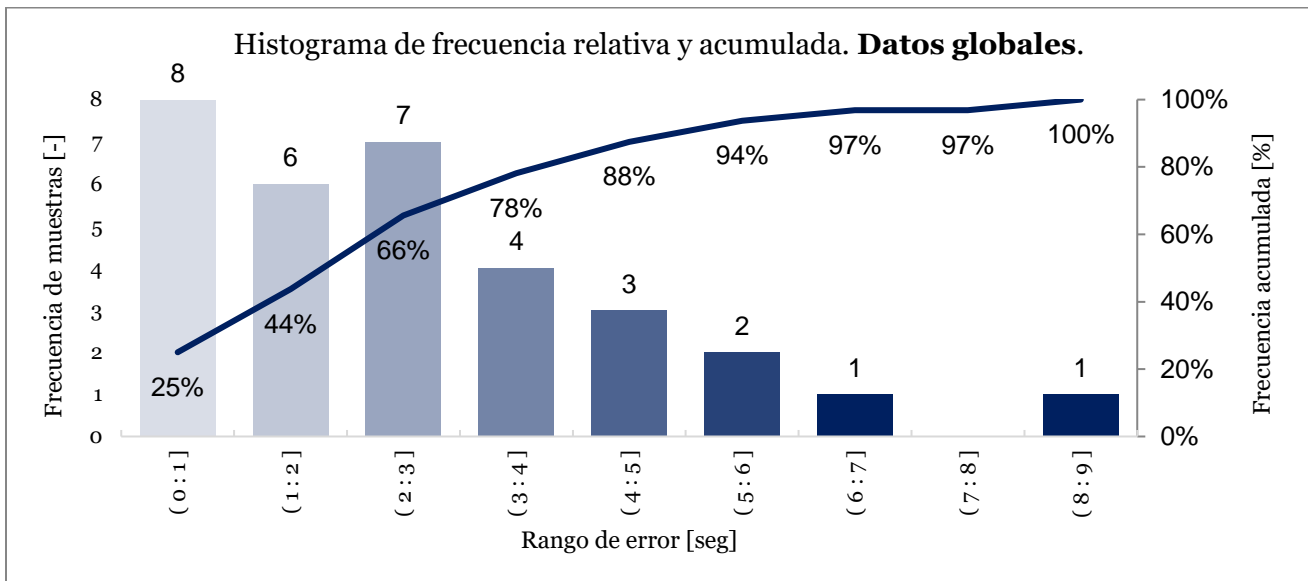


Gráfica 10 Nivel de servicio en estado optimizado MOS vs Tritone

## 5.2 Validación global del modelo de optimización

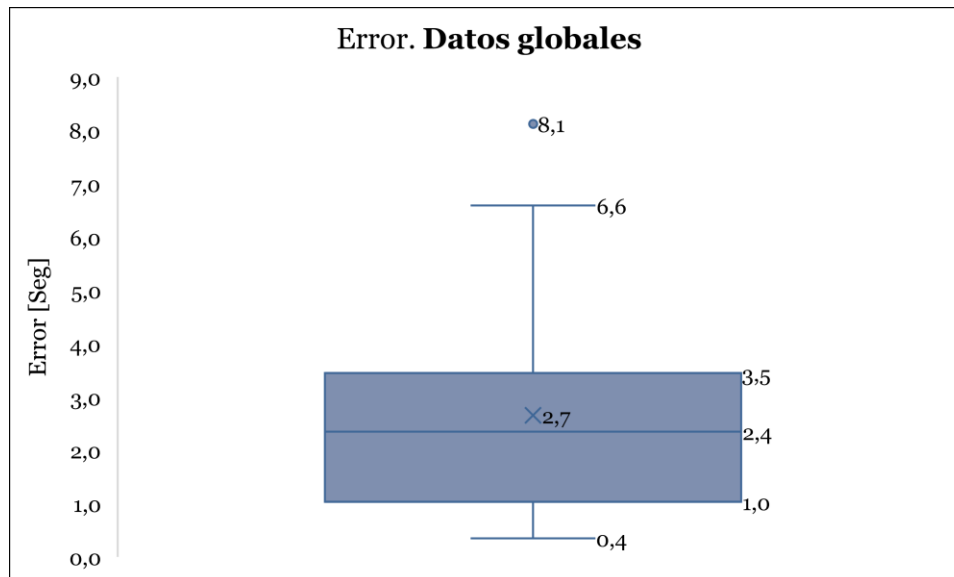
Para realizar la validación global del modelo de optimización se agrupa el estado actual y el estado optimizado, en una única lista de datos, obteniendo 32 muestras para el análisis estadístico.

Con las 32 muestras de estudio, se genera un histograma relativo y acumulado Gráfica 11, donde se exhibe la comparación entre el número de muestras y el rango de error donde se encuentran las mismas. En esta gráfica, se puede apreciar que la mayor frecuencia de 8 intersecciones, se encuentra en el rango de error entre 0 y 1 seg. Además, se aprecia la curva de frecuencia acumulada, donde se aprecia que el 94% de los datos se encuentra con un error inferior a 6 seg.



*Gráfica 11 Histograma de frecuencia relativa y acumulada. Datos globales.*

Utilizando un diagrama de caja, presentado en la Gráfica 12, se determina un rango intercuartil del error de 2.5 seg comprendido entre el primer cuartil de 1.0 seg y el tercer cuartil de 3.5 seg, esto indica una acumulación del 50 % de la cantidad de datos centrales que se encuentran en un rango de error de 2.5 seg. Además, se observa la mediana de 2.4 seg y la media de 2.7 seg. Esta mínima diferencia indicaría una simetría en los datos, pero como se puede observar a partir del tercer cuartil los valores se incrementan considerablemente, por lo cual se determina la existencia del 25 % de los datos con valores elevados, obteniendo un valor alto como 6.6 seg, y un valor máximo de 8.1 seg.



Gráfica 12 Diagrama de caja de errores de estado actual y optimizado

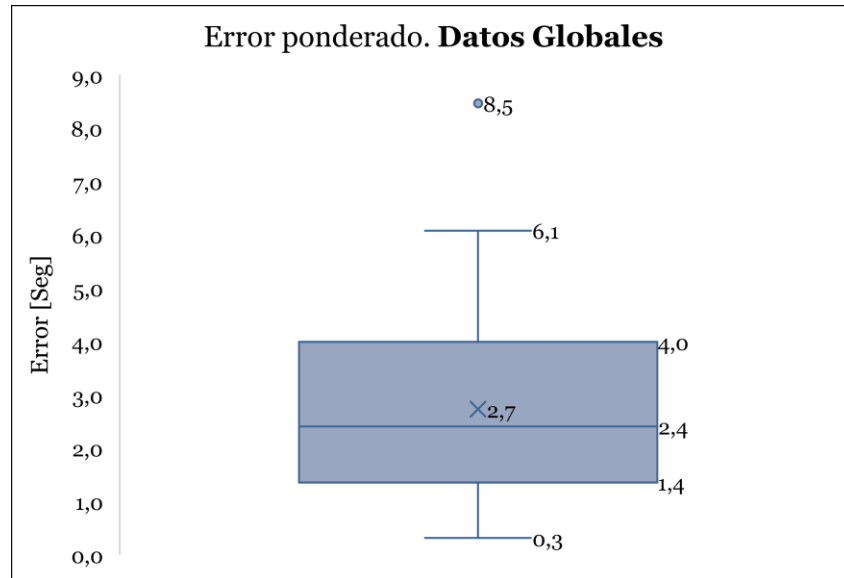
Procediendo con la obtención del error ponderados de todos los datos, se exhibe en Tabla 16 los errores ponderados de las 16 intersecciones considerando el estado actual y optimizado, es decir 32 valores. A su vez se presentan los factores utilizados para la determinación de estos errores, considerando de que el valor promedio de la duración de ciclo es de 52 seg.

Error ponderado global																
Valor promedio de ciclo semafórico [seg]								52								
Intersección	MT_4	MT_40	MT_41	MT_43	MT_45	MT_46	MT_49	MT_50	MT_56	MT_61	MT_64	MT_67	MT_68	MT_69	MT_70	MT_73
Estado actual																
Duración de ciclo [seg]	62	79	68	78	75	60	78	50	58	64	55	77	59	68	69	48
Factor	0.84	0.66	0.77	0.67	0.70	0.87	0.67	1.04	0.90	0.81	0.95	0.68	0.88	0.77	0.76	1.09
Error [seg]	0.38	2.9	2.86	6.59	4.26	4.65	0.93	1.82	5.2	2.2	0.84	1.49	4.67	3.3	5.75	1.6
Error ponderado [seg]	0.32	1.91	2.19	4.40	2.96	4.04	0.62	1.90	4.67	1.79	0.80	1.01	4.13	2.53	4.34	1.74
Estado optimizado																
Duración de ciclo [seg]	54	41	29	50	34	45	30	38	30	43	64	34	31	34	33	30
Factor	0.97	1.27	1.80	1.04	1.53	1.16	1.74	1.37	1.74	1.21	0.81	1.53	1.68	1.53	1.58	1.74
Error [seg]	1.34	3.16	2.07	8.12	2.5	0.35	3.5	2.62	1.73	0.5	3.1	2.56	0.93	1.5	0.75	0.9
Error ponderado [seg]	1.29	4.02	3.72	8.47	3.83	0.41	6.08	3.59	3.01	0.61	2.52	3.92	1.56	2.30	1.18	1.56

Tabla 16 Error ponderado del estado actual y optimizado simultáneamente

En la Gráfica 13 se presentan los errores ponderados globales de las intersecciones semaforizadas, para ello se hace uso de un diagrama de caja, en donde el valor de 2.6 seg representa el rango intercuartil. Los valores 1.4 seg y 4.0 seg hacen referencia al primer y tercer cuartil. Los valores de media y mediana son de 2.7 y 2.4 seg, indicando nuevamente uniformidad entre los valores de error ponderado. El valor mínimo de error es 0.3 seg, mientras que el máximo es de 8.5 seg.

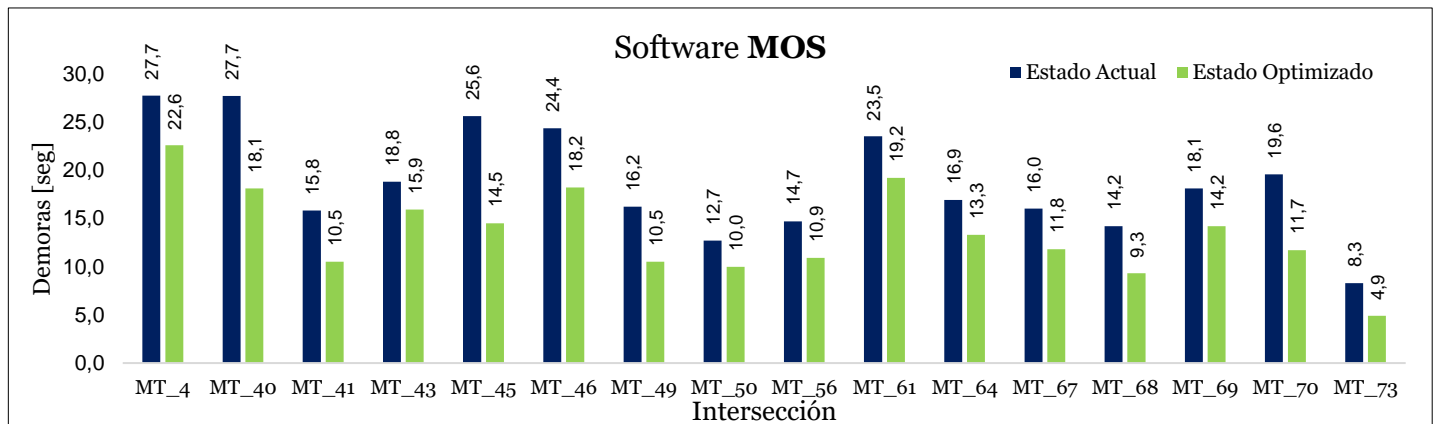




Gráfica 13 Diagrama de caja de errores ponderados de estado actual y optimizado

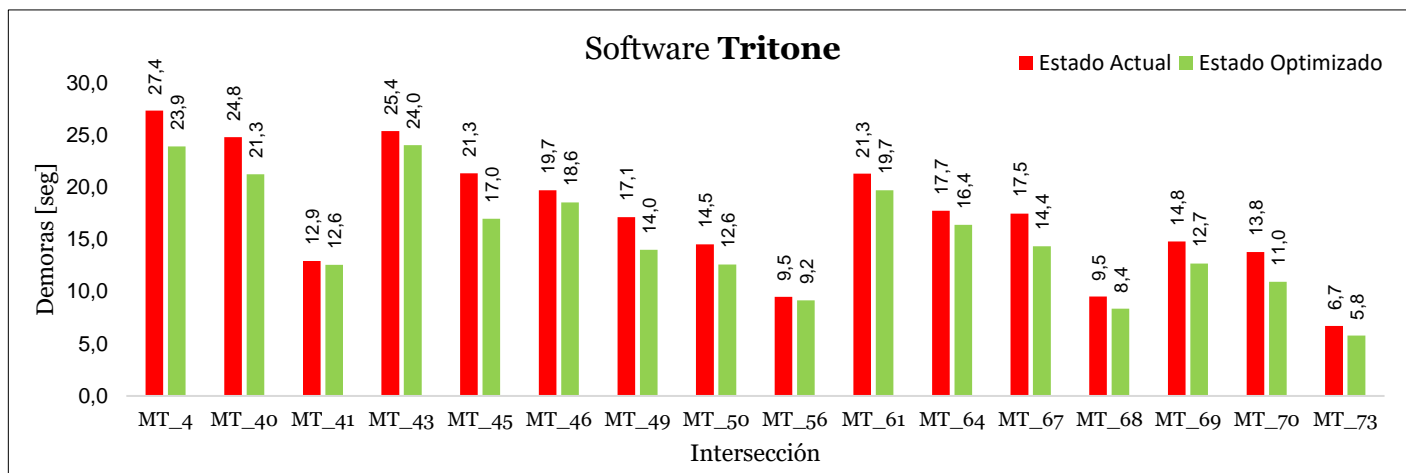
### 5.3 Análisis de optimización

Utilizando los resultados obtenidos para el estado actual y para el estado optimizado, mediante el modelo elaborado, se genera la Gráfica 14, donde se observa que en el estado actual el 100% de las intersecciones es decir 16 de ellas tienen un mayor tiempo de demora que las intersecciones que utilizan la fase optimizada mediante el software generado. Esto indica una falta de calibración de las intersecciones analizadas individualmente.



Gráfica 14 Variación de demoras estado actual vs estado optimizados. Modelo de optimización (MOS).

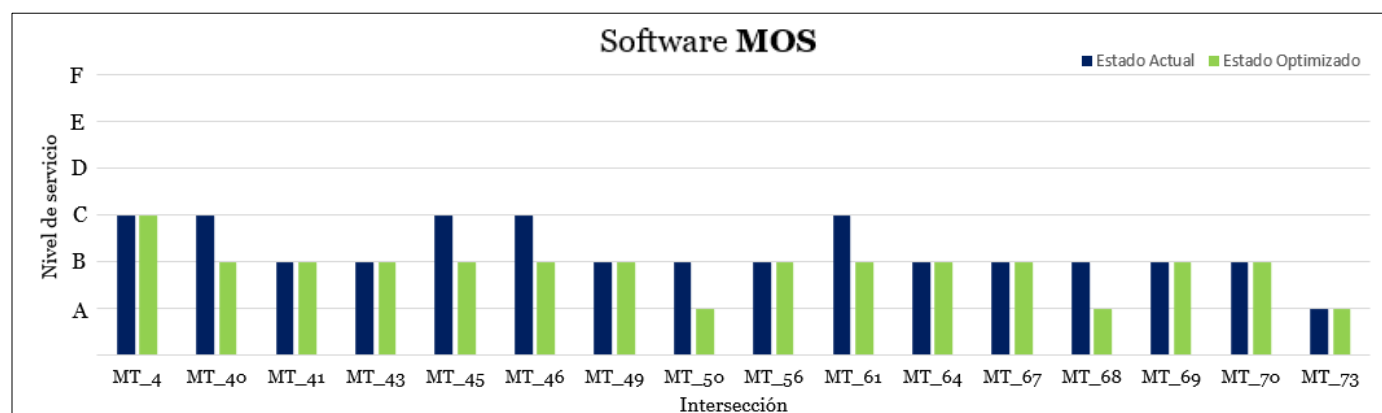
De la misma manera se muestra, en la Gráfica 15, las demoras obtenidas para el estado actual y para el estado optimizado, mediante el software Tritone. Donde se exhibe que al igual que en el modelo de optimización elaborado, las 16 intersecciones presentan una mejora en los tiempos de demoras vehiculares.



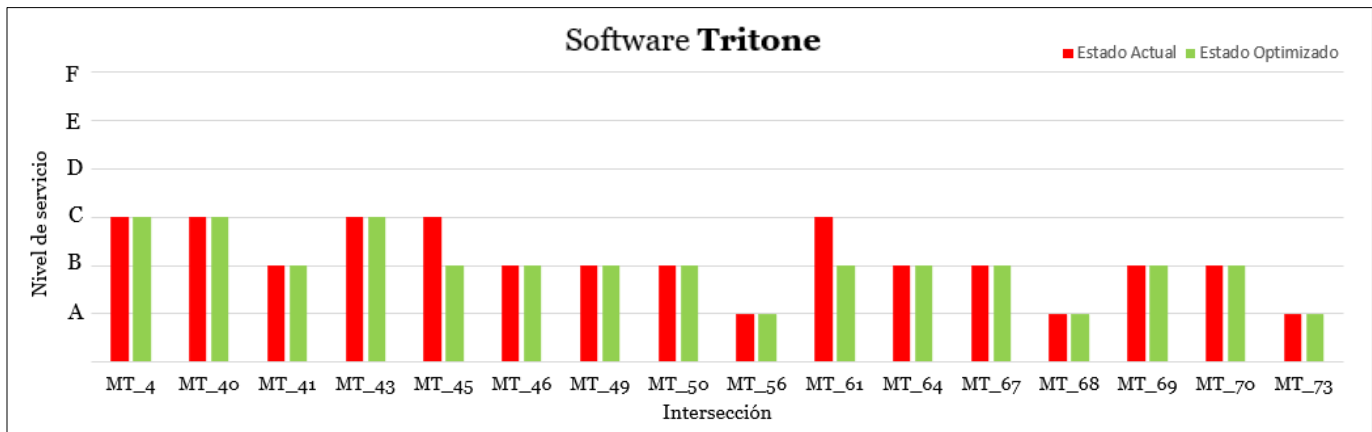
*Gráfica 15 Variación de demoras estado actual vs estado optimizados. Modelo de optimización (MOS).*

Tal como se observa existe una mejora posible para las intersecciones de análisis. Aplicando los resultados del modelo de optimización esta mejora se puede observar en el nivel de servicio de 6 intersecciones presentes en la Gráfica 16.

Al igual que para el modelo desarrollado, se presenta la Gráfica 17, en donde se presenta los niveles de servicio obtenidas con el software Tritone, donde se observa la mejora de 2 intersecciones con respecto al nivel de servicio analizado según (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010).



*Gráfica 16 Variación del nivel de servicio estado actual vs estado optimizados. Modelo de optimización.*



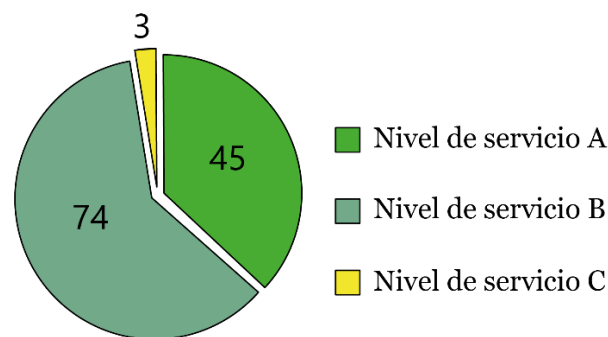
Gráfica 17 Variación del nivel de servicio estado actual vs estado optimizados. Software Tritone.

#### 5.4 Caracterización peatonal de intersecciones

Otra función del modelo de optimización semafórico es el análisis del funcionamiento de la intersección para los peatones. De igual manera que en el análisis vehicular, se utiliza las 16 intersecciones para conocer y caracterizar a estas, desde el punto de vista del peatón.

El análisis peatonal se divide en tres grupos, siendo estos; nivel de servicio de la aproximación, espacio disponible durante el cruce peatonal y espacio disponible en aceras.

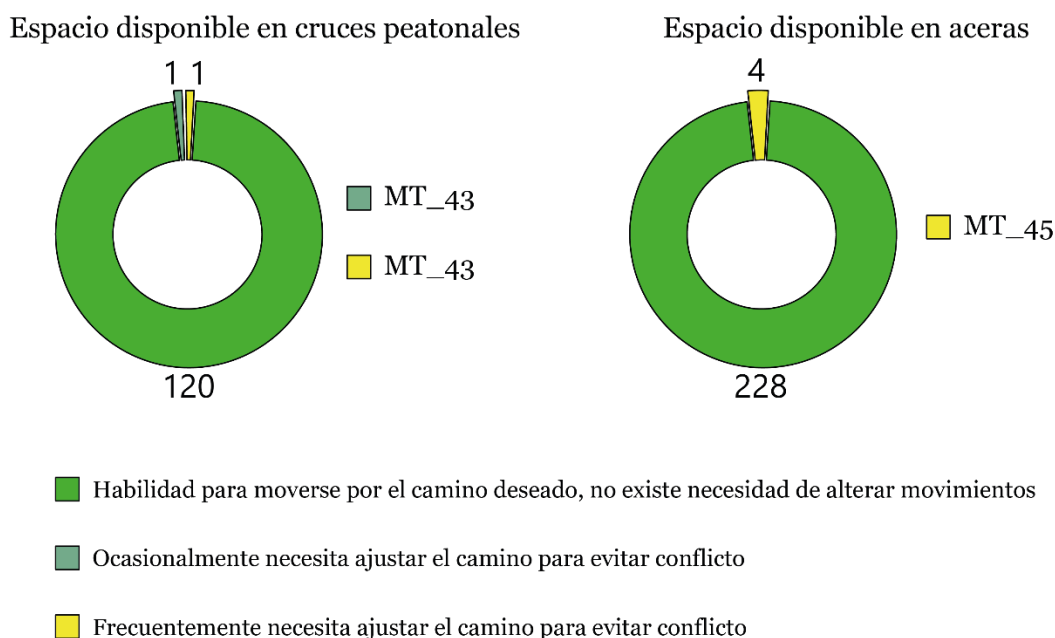
En la Gráfica 18, se observa el nivel de servicio de 122 aproximaciones, en donde el 60.7% de las aproximaciones se encuentran en un nivel de servicio “A”, 36.8% con un nivel de servicio “B” y 2.5% en nivel de servicio “C”. Las tres aproximaciones que cuentan con un nivel de servicio “C” pertenecen a las siguientes intersecciones: [2] Av. Solano y Luis Moreno Mora, [1] Abelardo J. Andrade y Los Cerezos.



Gráfica 18 Nivel de servicio de aproximaciones

En la Gráfica 19, correspondiente al espacio disponible en cruces peatonales y aceras, se observa que existen dos cruces en los cuales se presenta un conflicto al momento de realizar el cruce peatonal. Ambos cruces pertenecen a la intersección Av. Solano y Luis

Moreno Mora, el primero para el estado actual “B” y el segundo para el estado optimizado “C”. A su vez en la gráfica mencionada, en el espacio disponible en aceras, se presenta una intersección que frecuentemente necesita ajustar el camino para evitar algún conflicto. Esta intersección es la Av. Ordoñez Lasso y Av. De los Cerezos.



Gráfica 19 Espacio disponible para el peatón; cruce peatonal, espera

## 5.5 Análisis de beneficio por la utilización del modelo de optimización

Los intervalos de tiempo de verde optimizados para todas las intersecciones presentan una mejor distribución de los flujos vehiculares, validados por el software Tritone. En el 100 % de las intersecciones analizadas, es decir 16 existe una disminución del tiempo de demora, mientras que para el nivel de servicio se obtienen mejoras o en el peor de los casos un nivel similar al ya existente. Dando a entender de que la intersección ya cuenta con el mejor nivel de servicio posible.

Además de las mejoras vehiculares, el modelo de optimización cuenta con el análisis de los flujos peatonales de las intersecciones, siendo un valor agregado para el modelo de cálculo elaborado. Este análisis ayuda al ingeniero vial ya que exhibe el nivel de servicio otorgado al peatón para cada aproximación de la intersección.

Como se observa en los capítulos anteriores, el ingreso de datos, cálculos y posterior análisis de los resultados obtenidos por el modelo de optimización cuentan con una interfaz



amigable para el usuario. Facilitando y acelerando el análisis de intersecciones semaforizadas de tres y cuatro ramales.

## CAPÍTULO 6

### 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se exhiben las conclusiones y recomendaciones obtenidas debido al desarrollo del modelo de optimización semafórico. El mismo que parte de aforos de 16 intersecciones de la ciudad de Cuenca, Ecuador en el año 2014 y posteriormente es validado mediante microsimulación vehicular utilizando el software Tritone.

#### 6.1 Conclusiones

En las 16 intersecciones semafóricas analizadas con el modelo de optimización semafórico, todas estas presentan una disminución en el tiempo de demora vehicular de la intersección, dando como promedio una disminución de la demora en 5.3 seg. Esto ocurre debido únicamente a la variación de los intervalos de verde de los ciclos semafóricos.

De 81 intersecciones aforadas en el año 2014, 34 intersecciones cuentan con sistemas semaforizados, de estas solo 16 intersecciones poseen con la información necesaria para el correcto análisis de las mismas.

El modelo de cálculo generado y programado determina las demoras y nivel de servicio que presentan los flujos vehiculares de la intersección. Concluyendo que el modelo es funcional y válido para el análisis de intersecciones semaforizadas de 3 y 4 ramales, comparando sus resultados con el software de microsimulación Tritone.

En un segundo proceso el modelo de optimización semafórico, determina una nueva configuración de fases semafóricas y para cada una de las fases la mejor configuración de los intervalos de verde, con la finalidad de disminuir el tiempo de demora de toda la intersección.

Las 16 intersecciones al ser analizadas mediante el software de microsimulación Tritone, presentan un error ponderado en el tiempo de demora de la intersección con respecto al modelo de optimización semafórico, el rango de este valor ponderado se encuentra entre 0.32 seg y 8.47 seg.

Tomando los nuevos intervalos de verde para las fases semafóricas, se valida que, en 16 intersecciones, el tiempo de demora se disminuye. Corroborando estos mediante la utilización del software Tritone.

Adicionalmente y considerando el nivel de servicio que presenta el modelo de optimización semafórico, en el nivel de servicio que presentan las 16 intersecciones antes y después de la optimización se observa una mejora en 6 intersecciones, mientras que en las otras 10 se mantiene el mismo nivel de servicio. En el segundo caso a pesar de que no mejora el nivel de servicio, si presentan una disminución en el tiempo de demora. Sin embargo, esta disminución no recae en un aumento del nivel de servicio.

En base al correcto uso del modelo de optimización semafórico, este caracteriza a la intersección desde el punto de vista del peatón. Para ello descompone el análisis en; espacio con el que cuenta el peatón mientras espera poder realizar el cruce, espacio con el que cuenta el peatón mientras realiza el cruce, y el nivel de servicio peatonal de cada aproximación.

## **6.2 Recomendaciones**

Durante la utilización del modelo de optimización semafórico se recomienda que el ingreso de datos y uso del programa sea de manera secuencial, pues la omisión de uno de estos pasos puede entregar resultados erróneos para la intersección.

Para el uso del modelo de optimización semafórico se recomienda realizar un aforamiento vehicular y peatonal completo, es decir levantar; flujos vehiculares, flujos peatonales que utilizan la intersección, flujos peatonales que no usan la intersección, dimensiones de las vías, dimensiones de las aceras y características del ciclo semafórico en uso.

Debido a que el modelo de optimización es válido, se recomienda que el mismo puede ser aplicado para el análisis de intersecciones semaforizadas en ciudades donde se acepte la teoría presentada por (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010). Ya que los métodos exhibidos por este manual se pueden realizar de manera secuencial, de igual manera será válido un modelo de optimización semafórico si se llegase a utilizar el método de estimación gradual, para el cual se debe ingresar diferentes datos de entrada y considerar más factores.

Para el desarrollo del presente trabajo de titulación se utiliza el método de estimación rápido de intersecciones semaforizadas del año 2010, sin embargo, el modelo de optimización semafórico cuenta con la capacidad de ser actualizado si (Diez, Martínez, Nuñez, & Romana, 2010) presentan una actualización al manual.



En adición se recomienda que, con el uso de cualquier software para realizar análisis de macrosimulación o microsimulación vehicular, sea el analista el encargado de interpretar de manera correcta los resultados y llevarlos hacia la realidad de cada ciudad. Pues para el desarrollo de diferentes programas se utilizan factores propios de cada localidad.



## BIBLIOGRAFÍA

- Alba M, M., & Hernández M, O. (enero-abril de 2013). Comparación de dos métodos de diseño para ciclos de semáforos. *IV(1)*, 41 - 49. Cuba: Revista Cubana de Ingeniería.
- Ardekani, S., Asante, S., & Williams, J. (1993). Selection Criterio for Left-Turn Phasing and Indication Sequence. *Transportation Research Record 1421*, 11.
- Aviles, J. (2015). Plan de movilidad y espacios públicos de la ciudad de Cuenca. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Cal y Mayor, R., & Cárdenas, J. (1972). Ingeniería de tránsito. México.
- Celis P, J., Escobar A, C., Sepúlveda M, S., Castro C, S., Medina D, B., & Ramírez M, J. (Julio - Diciembre de 2016). Control adaptativo para optimizar una intersección semafórica basado en un sistema embebido. Medellín, Colombia: Ingeniería y Ciencia.
- Cubic. (19 de Noviembre de 2019). Synchro 11 "software". San Diego. Obtenido de <https://www.trafficware.com/synchro.html>
- D'Ambrogio, A., Iazeolla, G., & Pieroni, A. (2009). Simulation Modelling Practice and Theory. *ELSVIER*, 625-640.
- De Schutter, B., & De Moor, B. (s.f.). Optimal traffic light control for a single intersection. *European Journal of Control*.
- Diez, R., Martínez, J. M., Nuñez, M., & Romana, M. (2010). *HCM 2010 Highway Capacity Manual*. Washington DC, Washington, Estados Unidos: TRB.
- Garber, N., & Hoel, L. (2009). *Traffic & Highway Engineering*. Virginia: CENGAGE Learning.
- Google, Inc. (s.f.). Panoramas a nivel de calle de la ciudad de Cuenca.
- Gutierrez Z., D. (2019). Aplicación del manual de capacidad de carreteras 2010 y el software Synchro 8.5 para la optimización de los semáforos en el centro de Juliaca. Puno, Perú: UNA-PUNO.
- Haibo, M., Jianning, Y., & Linzhong, L. (2010). Traffic signals control of urban traffic. *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery(7th )*, 763-767.

- Henríquez, K. (Septiembre de 2018). Estudio de alternativas para la mejora del tráfico y funcionalidad en la intersección semaforizada de la carretera Mella y Av. San Vicente de Paul en la ciudad de Santo Domingo Este, República Dominicana. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- INEC. (Octubre de 2019). Anuario de estadística de transporte 2018. Ecuador.
- Larriain, A. (2012). Consideraciones para la estimación de demoras en intersecciones semaforizadas. *Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería*. Santiago, Chile: Escuela de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- LlactaLAB. (Agosto de 2018). Crecimiento del parque automotor de la ciudad de Cuenca, Ecuador año 2018. Cuenca, Ecuador: U. d. Cuenca, Ed.
- Martínez Ambríz, E. (2012). Metodología para el análisis de capacidad y nivel de servicio en intersecciones semaforizadas de acuerdo al Manual de capacidad HCM 2000. México D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mejía Zumba, D., & Morocho Siguenza, J. (2016). Obtención de la disposición a pagar para disminuir la congestión vehicular en las Av. Huayna Cápac, 12 de Abril, Remigio Crespo Toral, Fray Vicente Solano y Américas de la ciudad de Cuenca periodo 2015. Cuenca, Azuay, Ecuador: U. d. Cuenca, Ed.
- Órdoñez Odi, J. (2017). Optimización de la programación de semáforos basada en las tasas de ocupación de buses y automóviles. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Otárola Figueroa, G. (2008). Estrategia Integrada de Control Predictivo Basada en Semáforos de Prioridad para la Optimización en Tiempo Real de las Operaciones de un Sistema de Transporte Público. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Ribera S, G., & Velásquez O, L. (2019). Determinación de ciclos semaforicos optimizados con Synchro 10.0 aplicados y evaluados en intersecciones de gran congestionamiento vehicular con el software PTV Vissim 9.0. Lima, Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Roca, V. (5 de Mayo de 2010). *Revista Vial*. Obtenido de Revista Vial: <https://revistavial.com/aplicacion-de-modelos-de-microsimulacion-en-la-ingenieria-del-transito-25993/>
- Roess, R., Prassas, E., & McShane, W. (2011). *Traffic engineering*. PEARSON.



Samuel, P. (1996). Peak Traffic Problems Reduced. ITS international.

Sánchez, J., Galán, M., & Rubio, E. (2005). Bit level versus gene level crossover in a traffic modeling environment. CIMCA.

Sanchez, P., & Villa G, F. (Agosto de 2012). Modelado y simulación del problema de movilidad vehicular en un sistema de intersecciones semaforicas. 15-22. Lámpsakos.

Special Report 209, H. (1985). Transportation Research Board. Washington D.C., USA: National Research Council.

University of Calabria. (2018). *UNICAL*. Obtenido de UNICAL: <http://tis.unical.it/index.php/development/tritone/>



## ANEXOS

## Anexo 1

QUICK ESTIMATION LEFT-TURN TREATMENT WORKSHEET				
<b>General Information</b>				
Description				
<b>Check # 1. Left-Turn Lane Check</b>				
Approach	EB	WB	NB	SB
Number of left-turn lanes				
Protect left turn (Y or N)?				
If the number of left-turn lanes on any approach exceeds 1, then it is recommended that the left turns on that approach be protected. Those approaches with protected left turns need not be evaluated in subsequent checks.				
<b>Check # 2. Minimum Volume Check</b>				
Approach	EB	WB	NB	SB
Left-turn volume				
Protect left turn (Y or N)?				
If left-turn volume on any approach exceeds 240 veh/h, then it is recommended that the left turns on that approach be protected. Those approaches with protected left turns need not be evaluated in subsequent checks.				
<b>Check # 3. Minimum Cross-Product Check</b>				
Approach	EB	WB	NB	SB
Left-turn volume, VL (veh/h)				
Opposing mainline volume, Vo (veh/h)				
Cross-product (VL * Vo)				
Opposing through lanes				
Protected left turn (Y or N)?				
Minimum Cross-Product Values for Recommending Left-Turn Protection				
Number of Through Lanes		Minimum Cross-Product		
1		50,000		
2		90,000		
3		110,000		
If the cross-product on any approach exceeds the above values, then it is recommended that the left turns on that approach be protected. Those approaches with protected left turns need not be evaluated in subsequent checks.				
<b>Check # 4. Sneaker Check</b>				
Approach	EB	WB	NB	SB
Left-turn volume, VL (veh/h)				
Sneaker capacity, cs (veh/h) $cs = 7200/C$				
Equivalence factor, EL1				
Protected left turn (Y or N)?				
If the equivalence factor is 3.5 or higher (computed in the Quick Estimation Lane Volume Worksheet) and the unadjusted left turn is greater than the sneaker capacity, then it is recommended that the left turns on that approach be protected.				
<b>Notes</b>				
1. If any approach is recommended for left-turn protection but the analyst evaluates it as having permitted operation, then this quick estimation method may give overly optimistic results. The analyst should instead use the methodology described in Chapter 18, Signalized Intersections.				
2. All volumes used in this worksheet are unadjusted hourly volumes.				

*Anexo 1 Estimación rápida Giro a la izquierda Hoja de trabajo de tratamiento HCM, pag 31-86*



## Anexo 2

QUICK ESTIMATION LANE VOLUME WORKSHEET			
<b>General Information</b>			
Description/Approach			
<b>Right-Turn Movement</b>			
	Exclusive RT Lane	Shared RT Lane	
RT volume, $V_R$ (veh/h)			
Number of exclusive RT lanes, $N_{RT}$		use 1	
RT adjustment factor, $f_{RT}$			
RT volume per lane, $V_{RT}$ (veh/h/ln)	$V_{RT} = \frac{V_R}{(N_{RT} \times f_{RT})}$		
<b>Left-Turn Movement</b>			
LT volume, $V_L$ (veh/h)			
Opposing mainline volume, $V_o$ (veh/h)			
Number of exclusive LT lanes, $N_{LT}$			
LT adjustment factor, $f_{LT}$			
LT volume per lane, $V_{LT}$ (veh/h/ln)	$V_{LT} = \frac{V_L}{(N_{LT} \times f_{LT})}$	Permitted LT, use 0	Protected LT
		Not Opposed LT	
<b>Through Movement</b>			
	Permitted LT	Protected LT	Not Opposed LT
Through volume, $V_T$ (veh/h)			
Parking adjustment factor, $f_p$			
Number of through lanes, $N_{TH}$			
Total approach volume, $V_{tot}$ (veh/h)			
$V_{tot} = \frac{V_{RT} (shared) + V_T + V_{LT} (not opp.)}{f_p}$			
<b>Through Movement with Exclusive LT Lane</b>			
Through volume per lane, $V_{TH}$ (veh/h/ln)	$V_{TH} = \frac{V_{tot}}{N_{TH}}$		
Critical lane volume, $V_{CL}$ (veh/h)			
Max[ $V_{LT}$ , $V_{RT}$ (exclusive), $V_{TH}$ ]			
<b>Through Movement with Shared LT Lane</b>			
Proportion of left turns, $PLT$		Does not apply	Does not apply
Equivalence factor, $EL_1$		Does not apply	Does not apply
Shared lane LT adjustment factor, $f_{DL}$			Use 1.0
Through volume per lane, $V_{TH}$ (veh/h/ln)			
$V_{TH} = \frac{V_{tot}}{(N_{TH} \times f_{DL})}$			
Critical lane volume, $V_{CL}$ (veh/h)			
Max[ $V_{RT}$ (exclusive), $V_{TH}$ ]			
<b>Notes</b>			
1. For RT shared or single lanes, use 0.85. For RT double lanes, use 0.75.			
2. For LT single lanes, use 0.95. For LT double lanes, use 0.92. For a one-way street or T-intersection, use 0.85 for one lane and 0.75 for two lanes.			
3. For unopposed LT shared lanes, $N_{LT} = 1$ .			
4. For exclusive RT lanes, $V_{RT} (shared) = 0$ . If not opposed, add $V_{LT}$ to $V_T$ and set $V_{LT} (not opp) = 0$ .			
5. $V_{LT}$ is included only if LT is unopposed. $V_{RT} (exclusive)$ is included only if RT is exclusive.			

Anexo 2 Hoja de cálculo de volumen de carril de estimación rápida, HCM pag 31-87



## Anexo 3

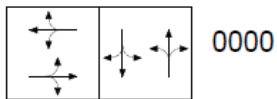
## QUICK ESTIMATION CONTROL DELAY AND LOS WORKSHEET

General Information														
Description/Approach														
East-West Phasing Plan														
Selected plan						Phase No. 1		Phase No. 2		Phase No. 3				
Movement codes														
Critical phase volume, CV (veh/h)														
Lost time/phase, tL (s)														
North-South Phasing Plan														
Selected plan						Phase No. 1		Phase No. 2		Phase No. 3				
Movement codes														
Critical phase volume, CV (veh/h)														
Lost time/phase, tL (s)														
Intersection Status Computation														
Critical sum, CS (veh/h) $CS = \sum CV$														
Lost time/cycle, L (s) $L = \sum tL$														
Reference sum flow rate RS (veh/h) <sup>1</sup>														
Cycle length, C (s) $C_{min} \leq C \leq C_{max}$ $C = C_{max}$ when $CS \geq RS$														
Critical v/c ratio, $X_c$ $X_c = \frac{CS}{1700 PHF f_a \left(1 - \frac{L}{C}\right)}$														
Intersection status (relationship to capacity)						Under ____ Near ____ At ____ Over ____								
Green Time Calculation														
East-West Phasing						Phase No. 1		Phase No. 2		Phase No. 3				
Green time, g (s)														
North-South Phasing						Phase No. 1		Phase No. 2		Phase No. 3				
Green time, g (s)														
Control Delay and LOS														
						EB		WB		NB		SB		
Lane group														
Lane group adjusted volume from Lane Volume worksheet, V (veh/h)														
Green ratio, g/C														
Lane group saturation flow rate, s (veh/h) $s = RS \cdot \text{number of lanes in lane group}$														
v/c ratio, X														
Lane group capacity, c (veh/h)														
Progression adjustment factor, PF														
Uniform delay, d1 (s/veh)														
Incremental delay, d2 (s/veh)														
Control delay, $d = d1(PF) + d2$ (s/veh)														
Delay by approach, da (s/veh)														
Approach flow rare, Va (s/veh)														
Intersection delay, Di (s/veh)						Intersection LOS (Exhibit 18-4)								
Notes														
1. RS = 1530 x PHF x fa, where fa is area adjustment factor (= 0.90 for CBD and 1.0 for all other area types).														

Anexo 3 Hoja de trabajo de demora de control de estimación rápida y nivel de servicio, HCM pag 31-91

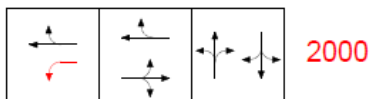
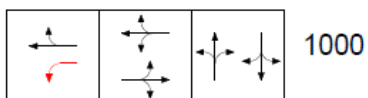
## Anexo 4

### Ciclos con 0 movimientos protegidos

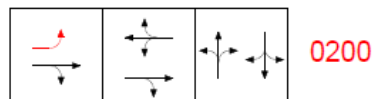
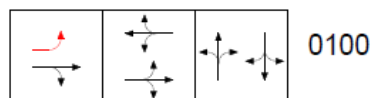


### Ciclos con 1 movimiento protegido

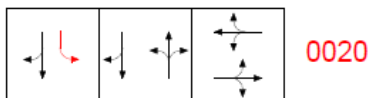
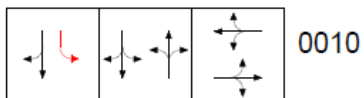
#### Este protegido



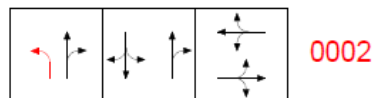
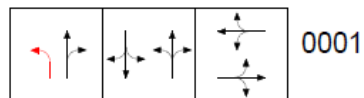
#### Oeste protegido



#### Norte protegido

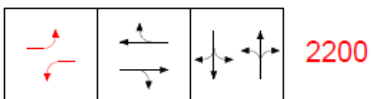
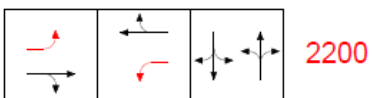
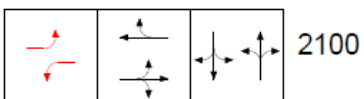
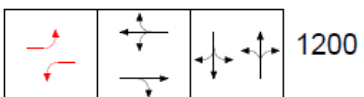
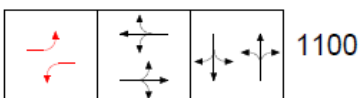


#### Sur protegido

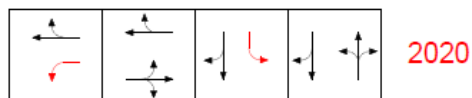
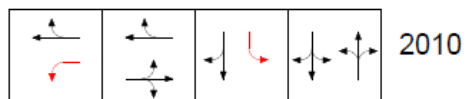
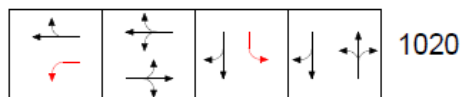
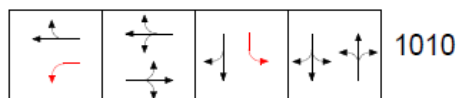


### Ciclos con 2 movimientos protegidos

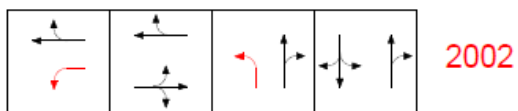
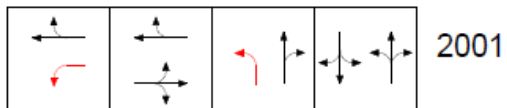
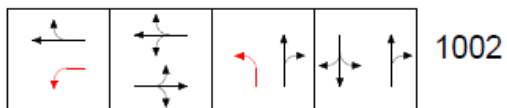
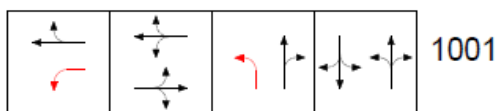
#### Este - oeste protegido



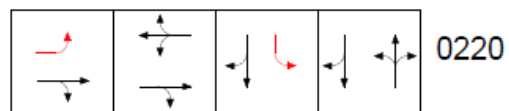
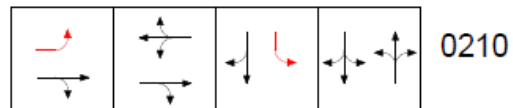
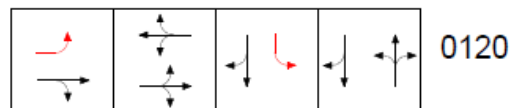
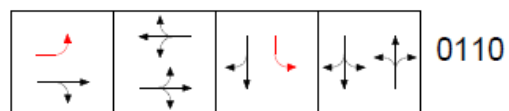
#### Este - norte protegido



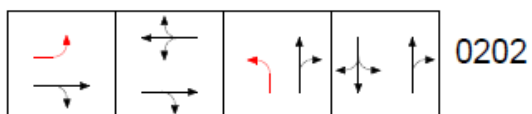
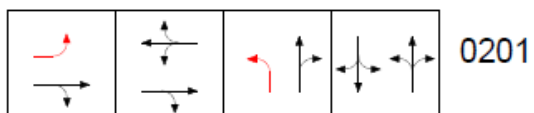
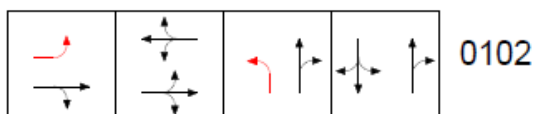
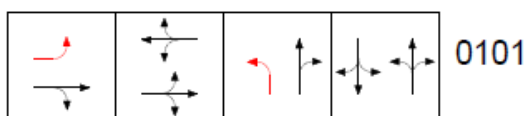
### Este - sur protegido



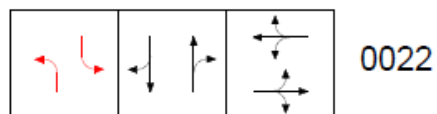
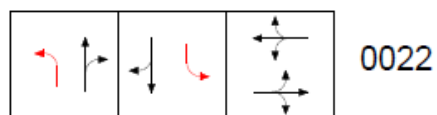
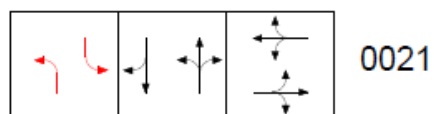
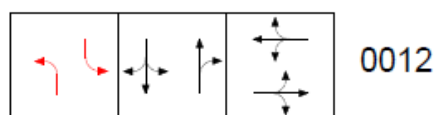
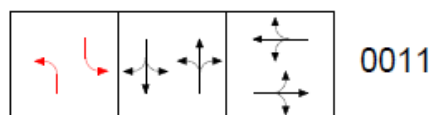
### Oeste - norte protegido



### Oeste - sur protegido



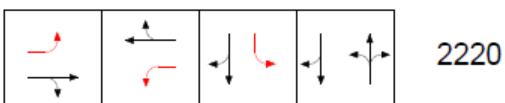
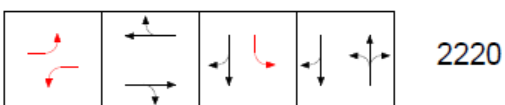
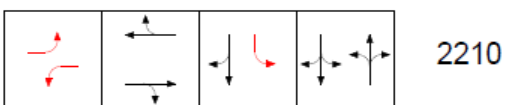
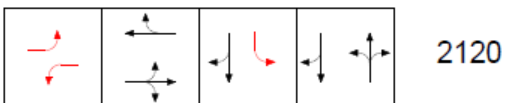
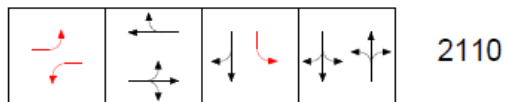
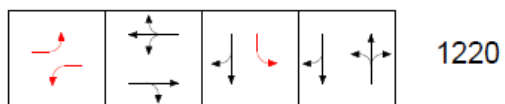
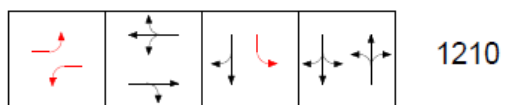
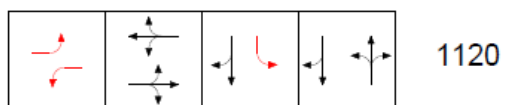
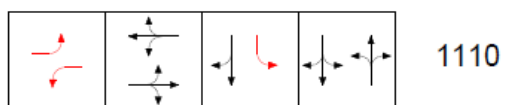
### Norte - sur protegido



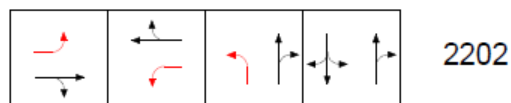
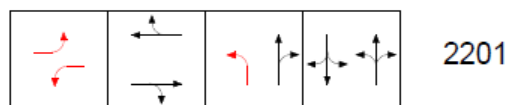
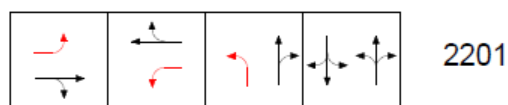
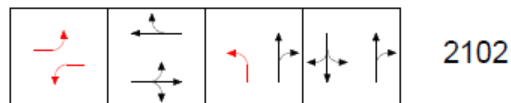
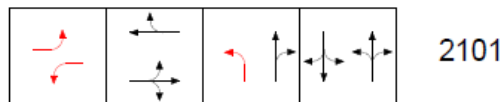
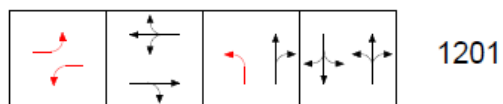
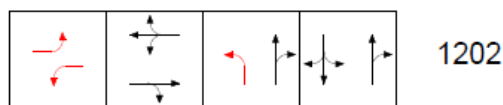
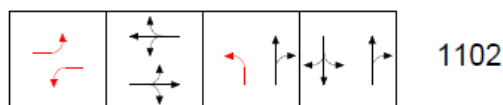
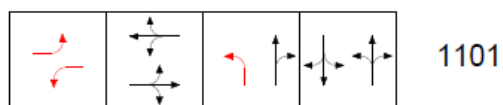


### Ciclos con 3 movimientos protegidos

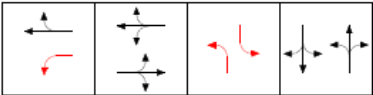
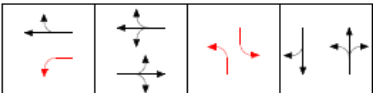




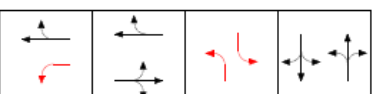
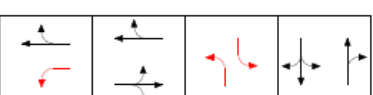
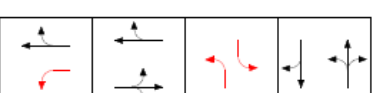
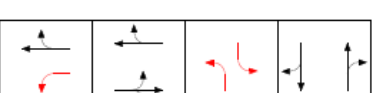

#### Este - oeste - norte protegido



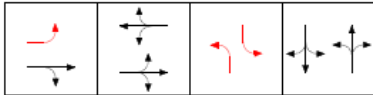
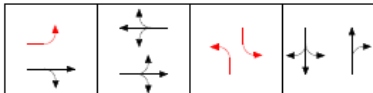
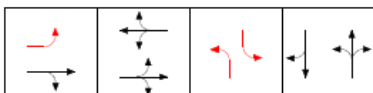

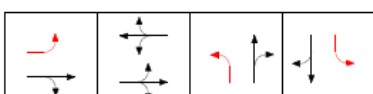



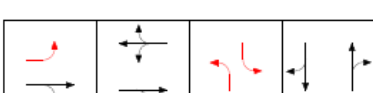

#### Este - oeste - sur protegido



Este - norte - sur protegido

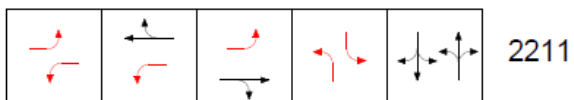
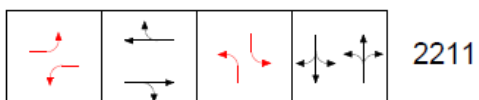
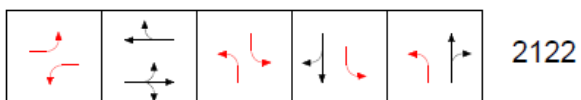
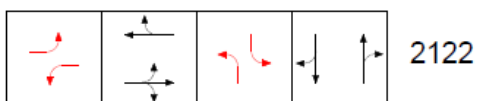
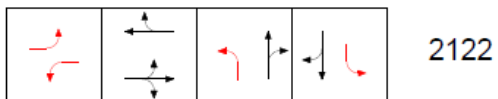
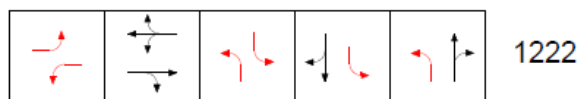
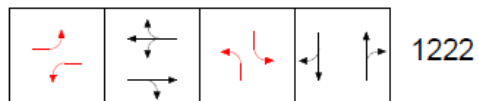
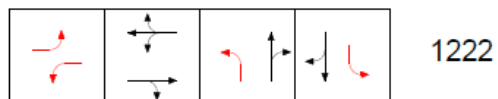
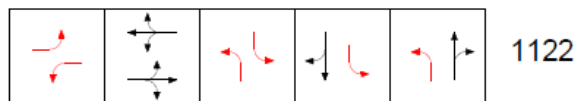
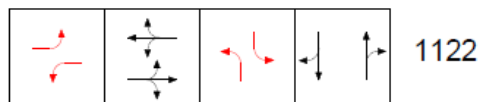
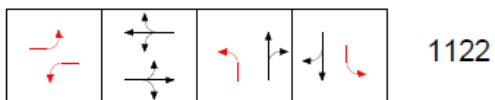
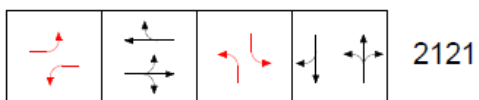
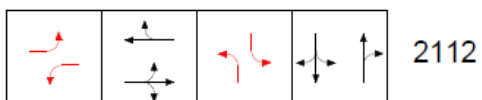
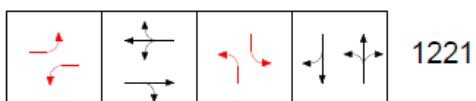
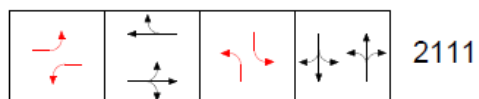
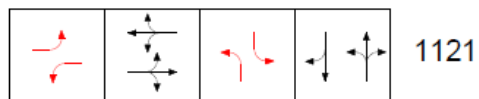
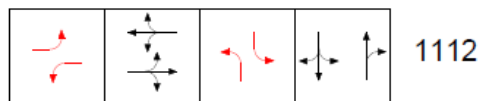
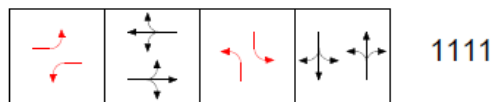
	1011
	1021
	1012
	1022
	1022
	1022
	2011
	2012
	2021
	2022
	2022

Oeste - norte - sur protegido

	0111
	0112
	0121
	0122
	0122
	0122
	0211
	0212
	0221
	0222
	0222

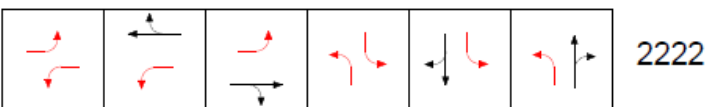
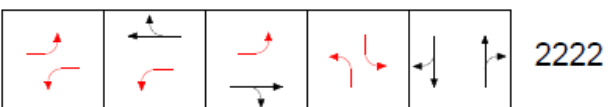
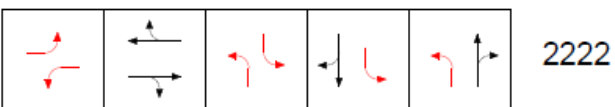
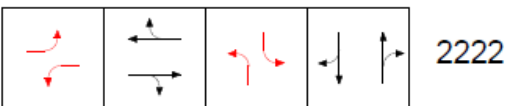
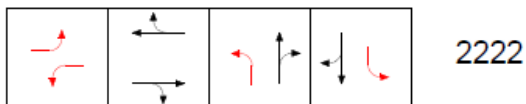
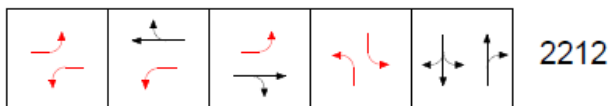
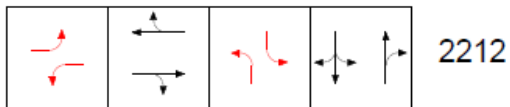
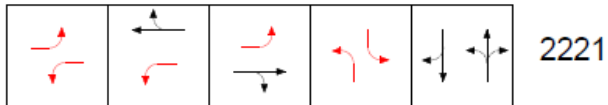
# Ciclos con 4 movimientos protegidos

Este - oeste - norte - sur protegido

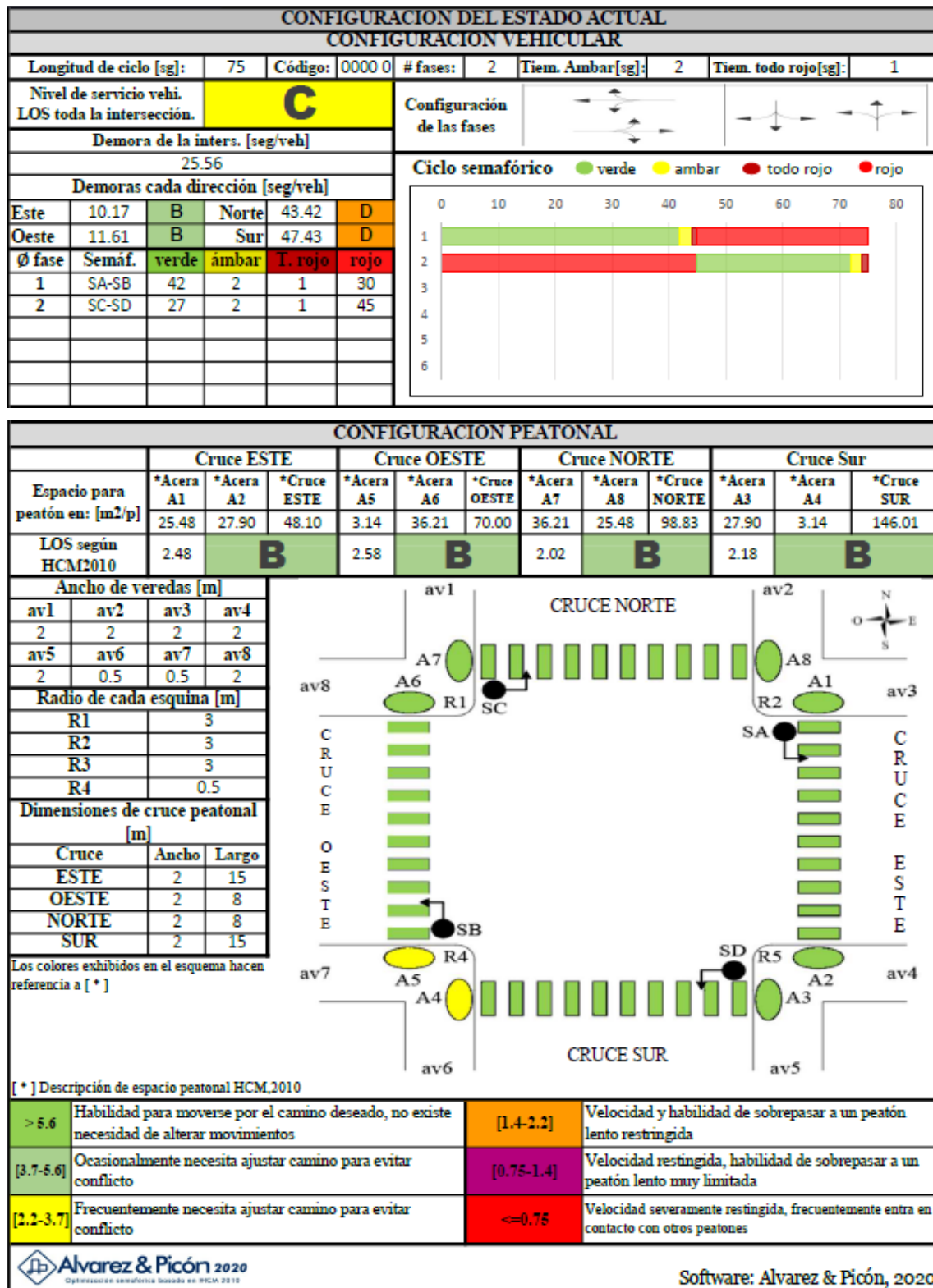


## Ciclos con 4 movimientos protegidos

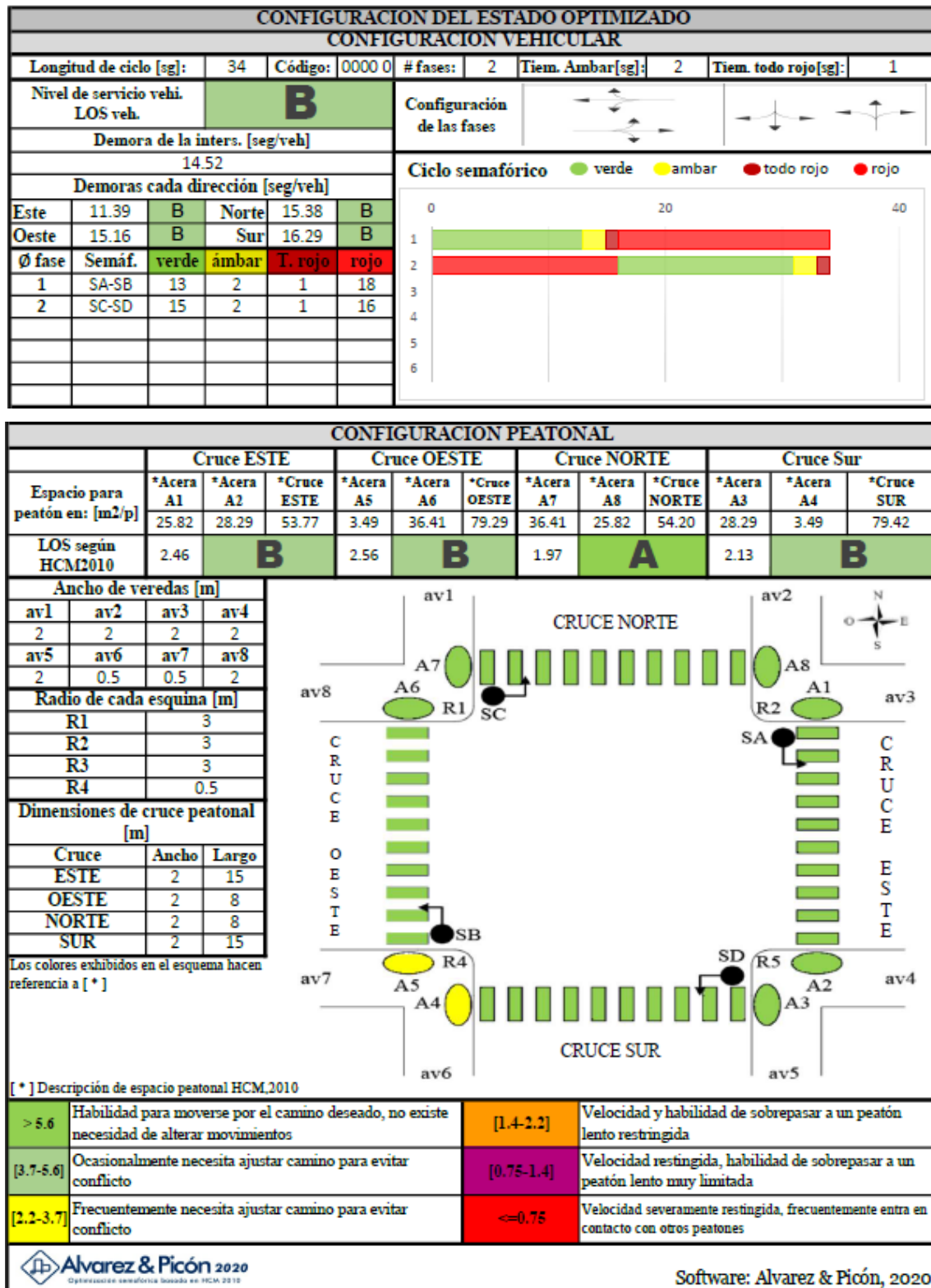
Este - oeste - norte - sur protegido

*Anexo 4 Base de datos de 103 fases semafóricas*

## Anexo 5

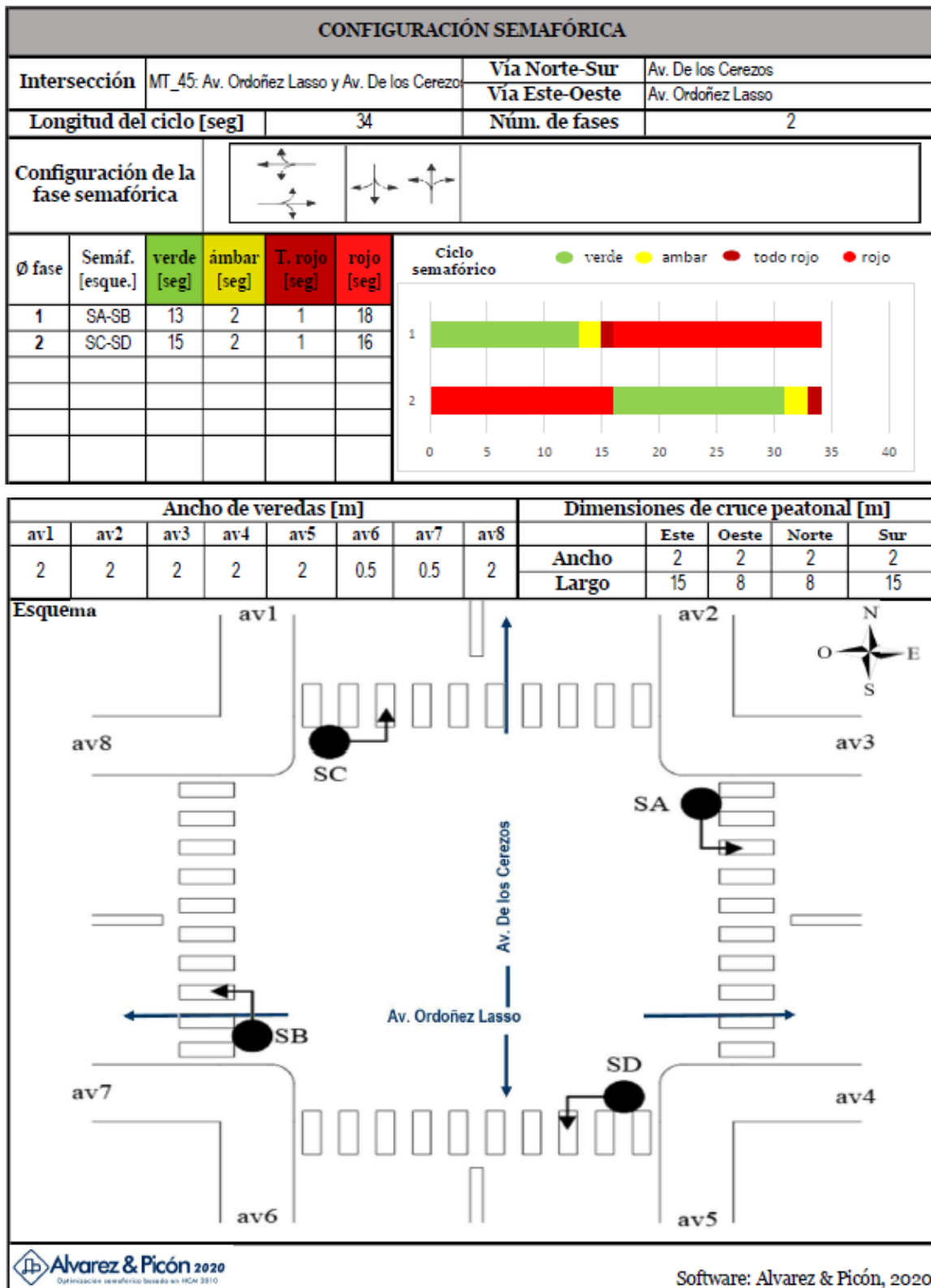


## Anexo 6



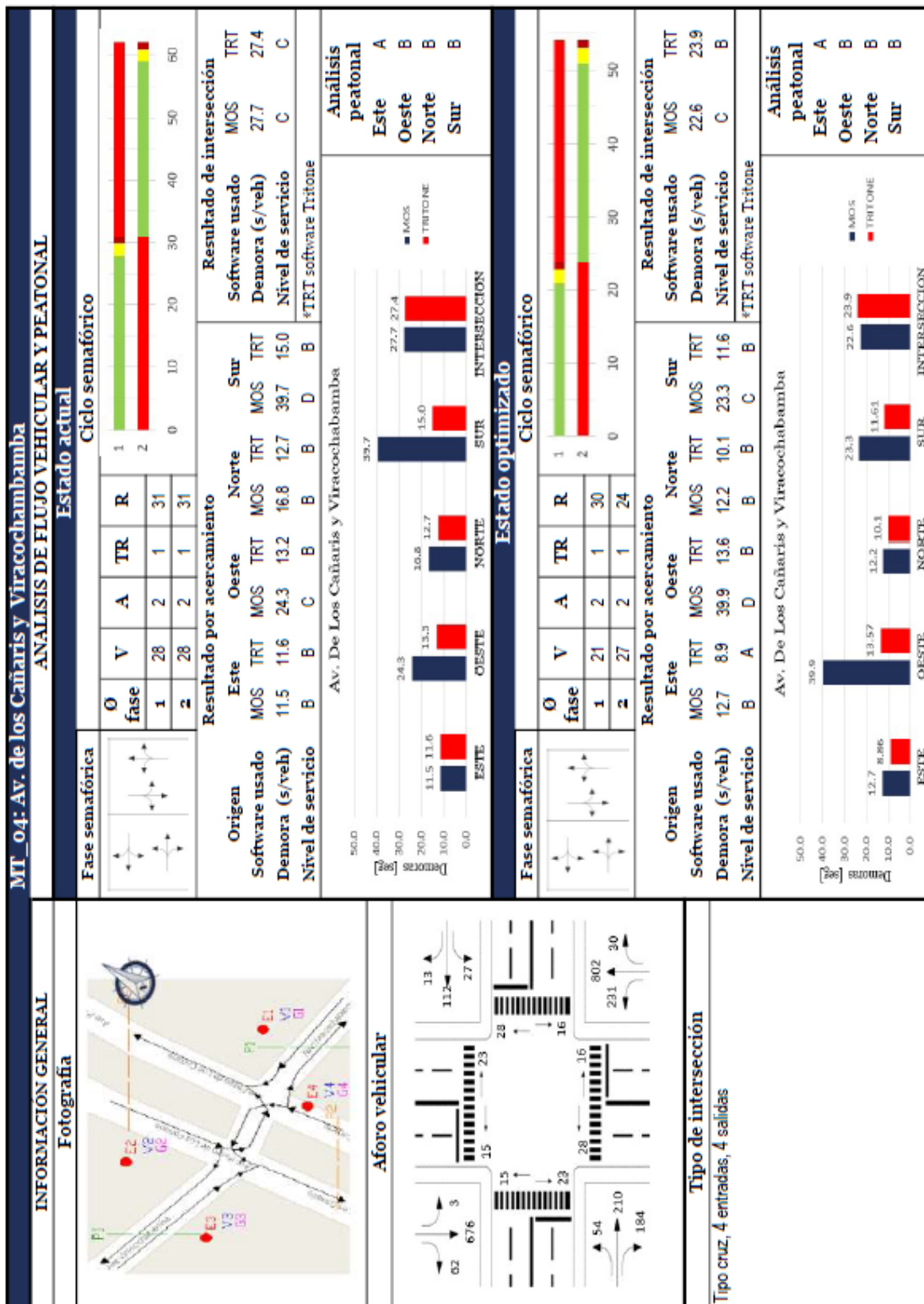
Anexo 6 Resumen estado optimizado MT\_45

## Anexo 7



Anexo 7 Resumen del estado seleccionado, estado optimizado MT\_45

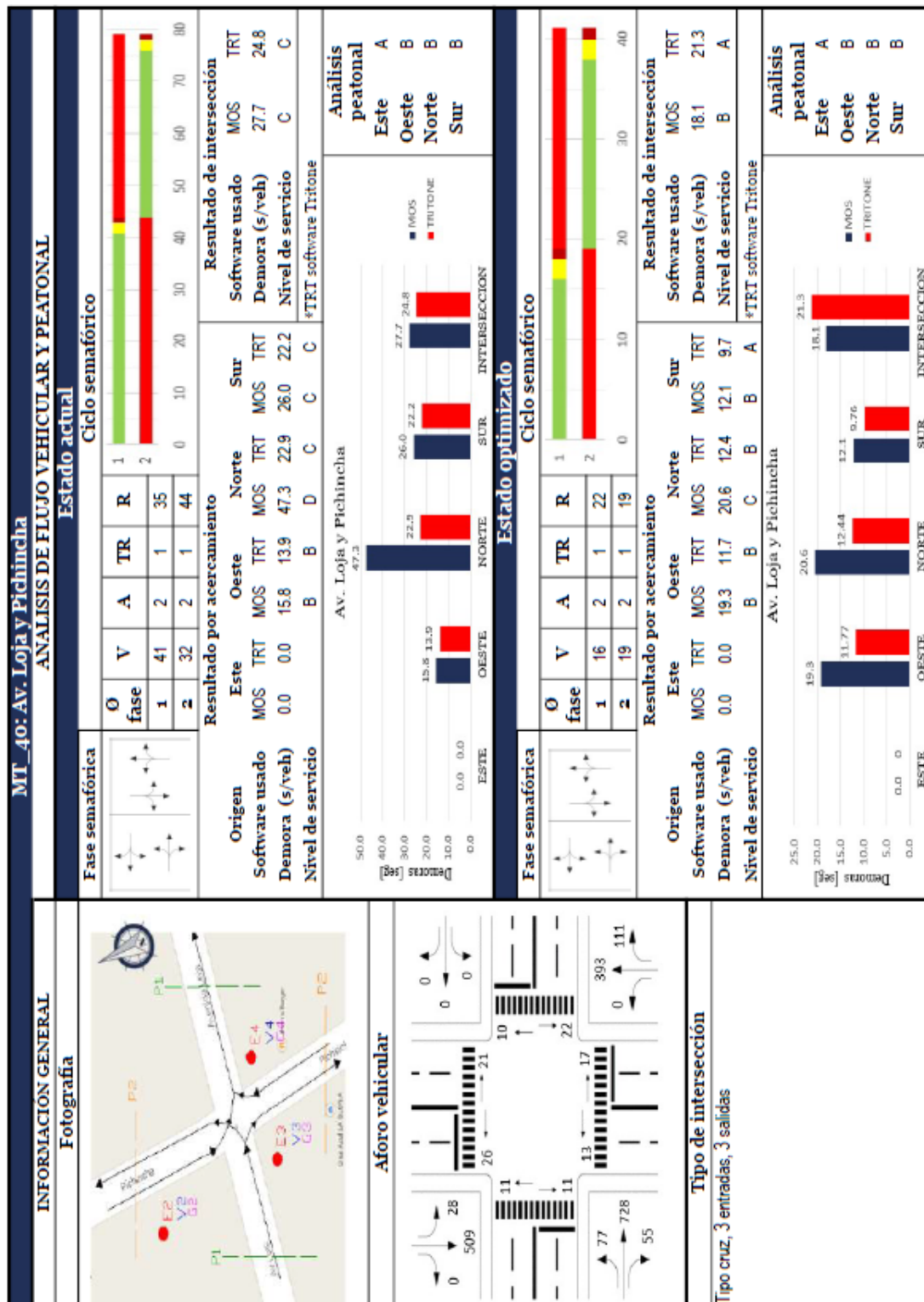
## Anexo 8



Anexo 8 Resumen MT\_04

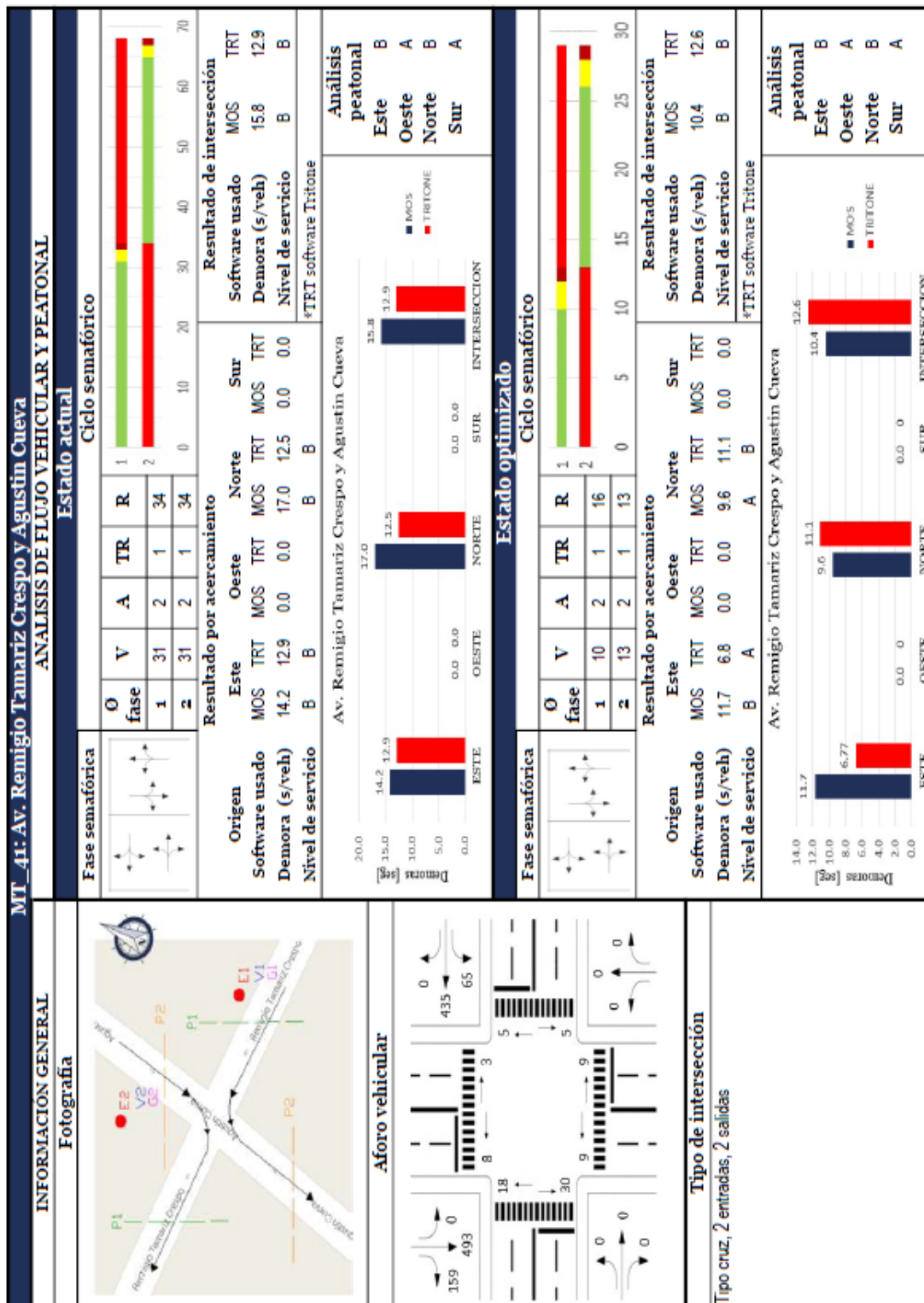


## Anexo 9



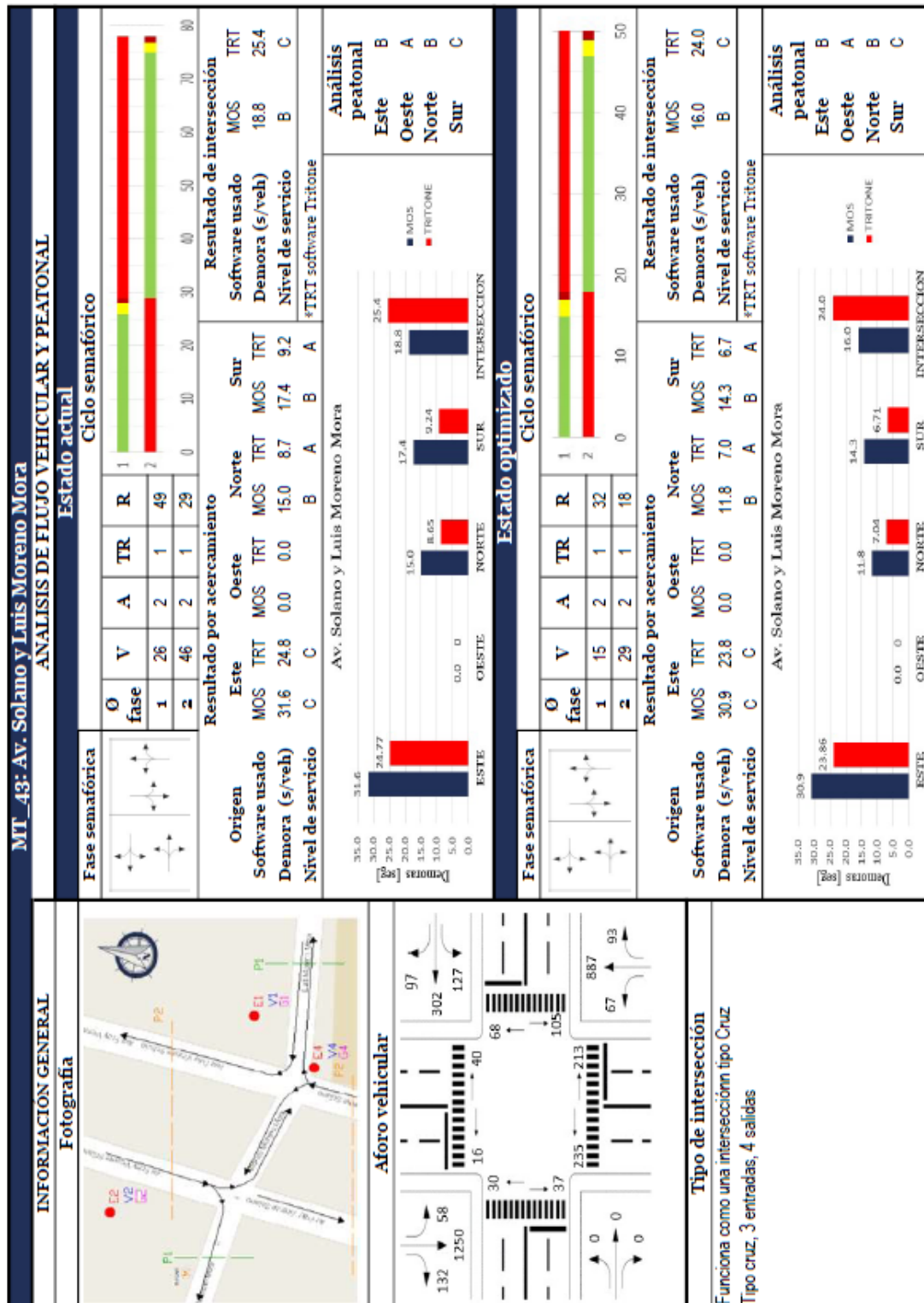
Anexo 9 Resumen MT\_40

## Anexo 10



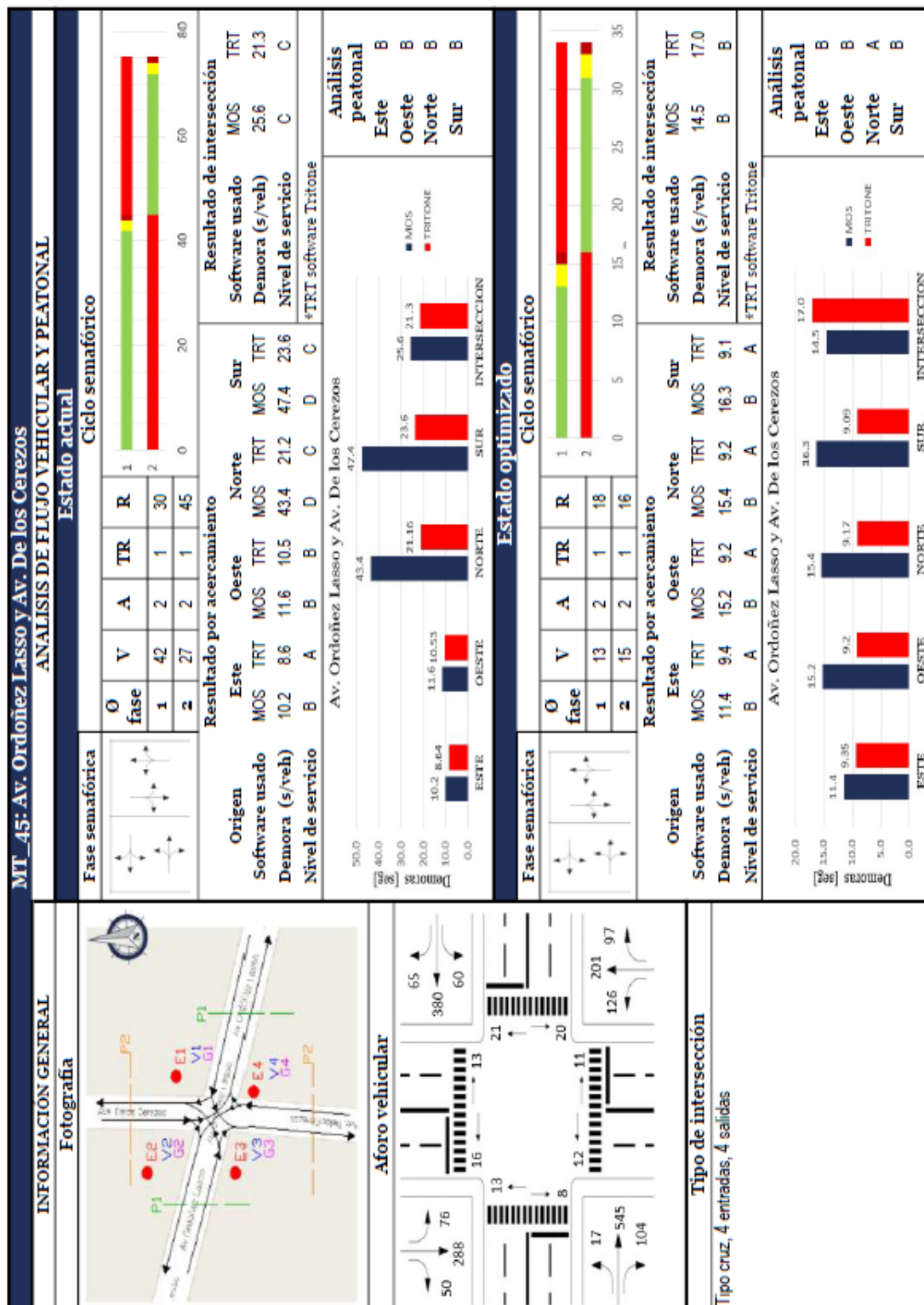
Anexo 10 Resumen MT\_41

## Anexo 11



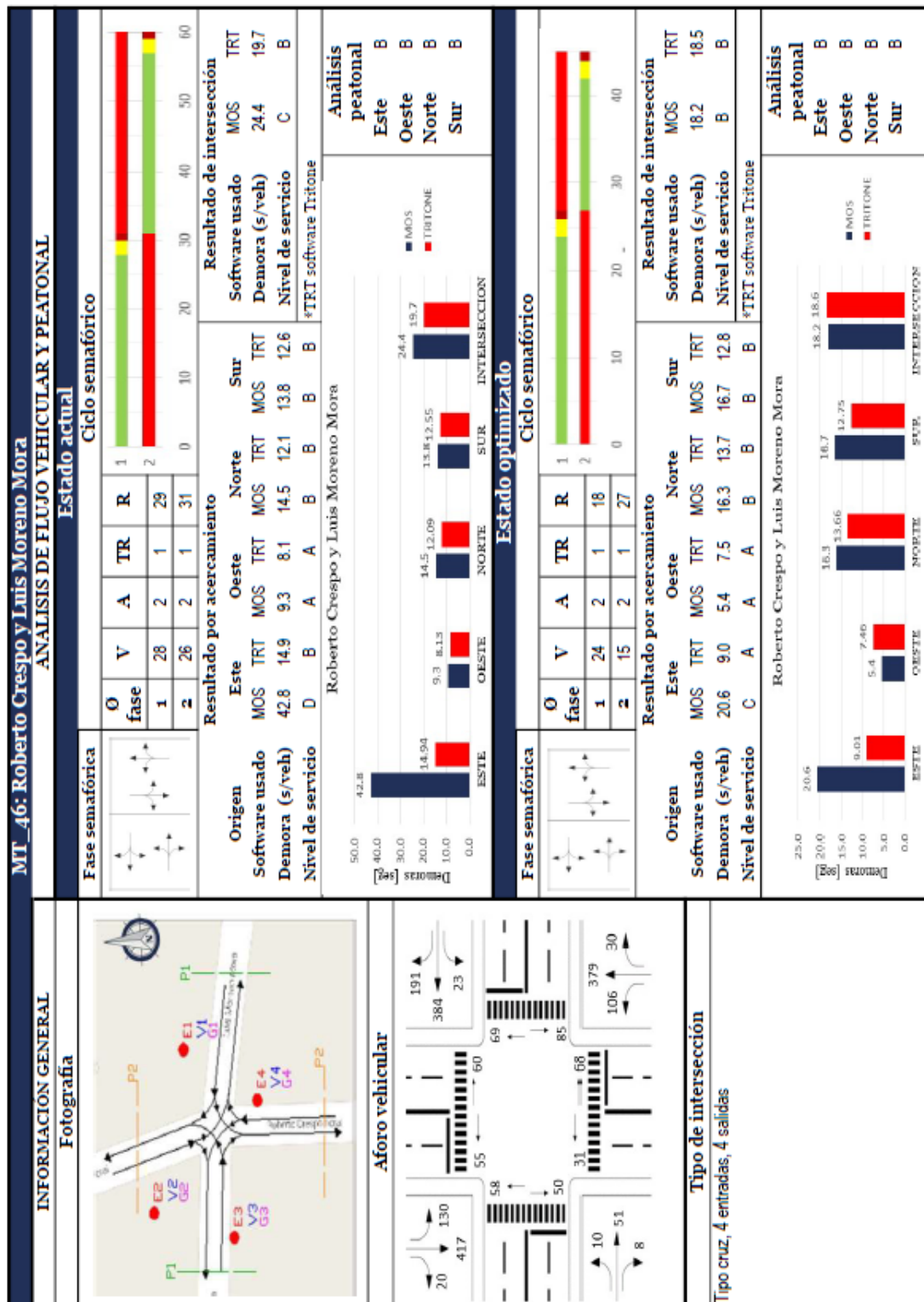
Anexo 11 Resumen MT\_43

## Anexo 12



## Anexo 12 Resumen MT\_45

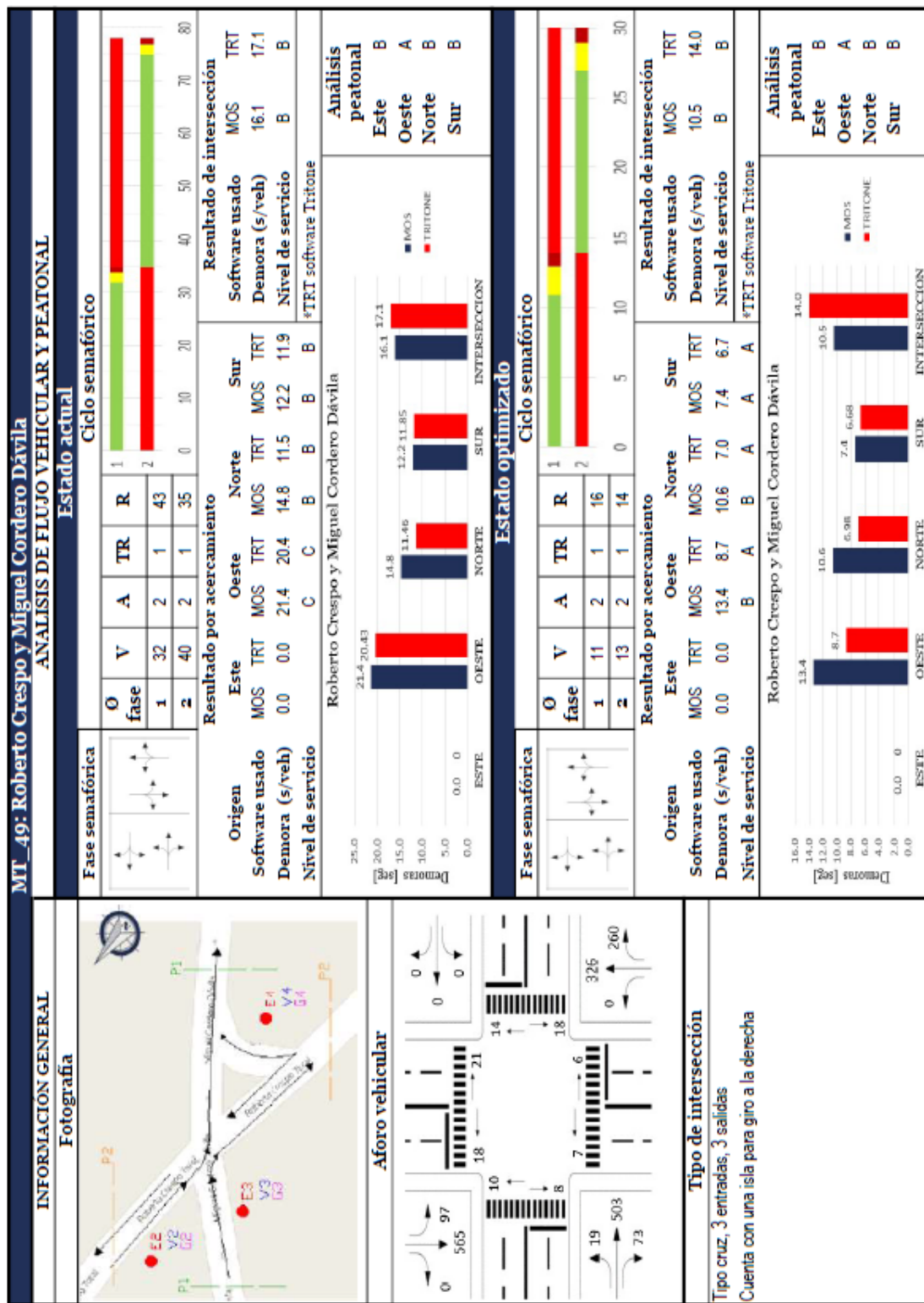
## Anexo 13



Anexo 13 Resumen MT\_46

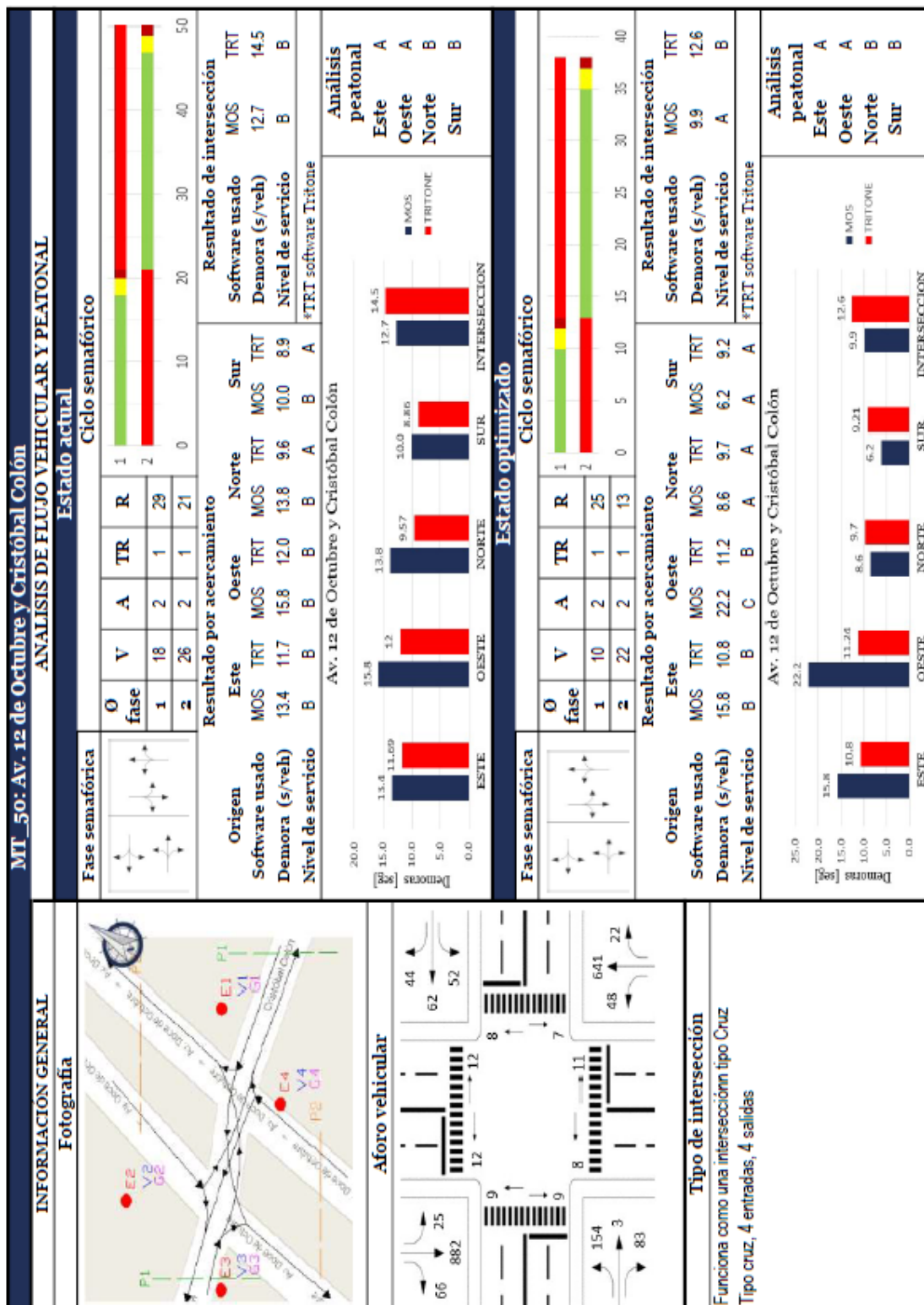


## Anexo 14



Anexo 14 Resumen MT\_49

## Anexo 15



Anexo 15 Resumen MT\_50

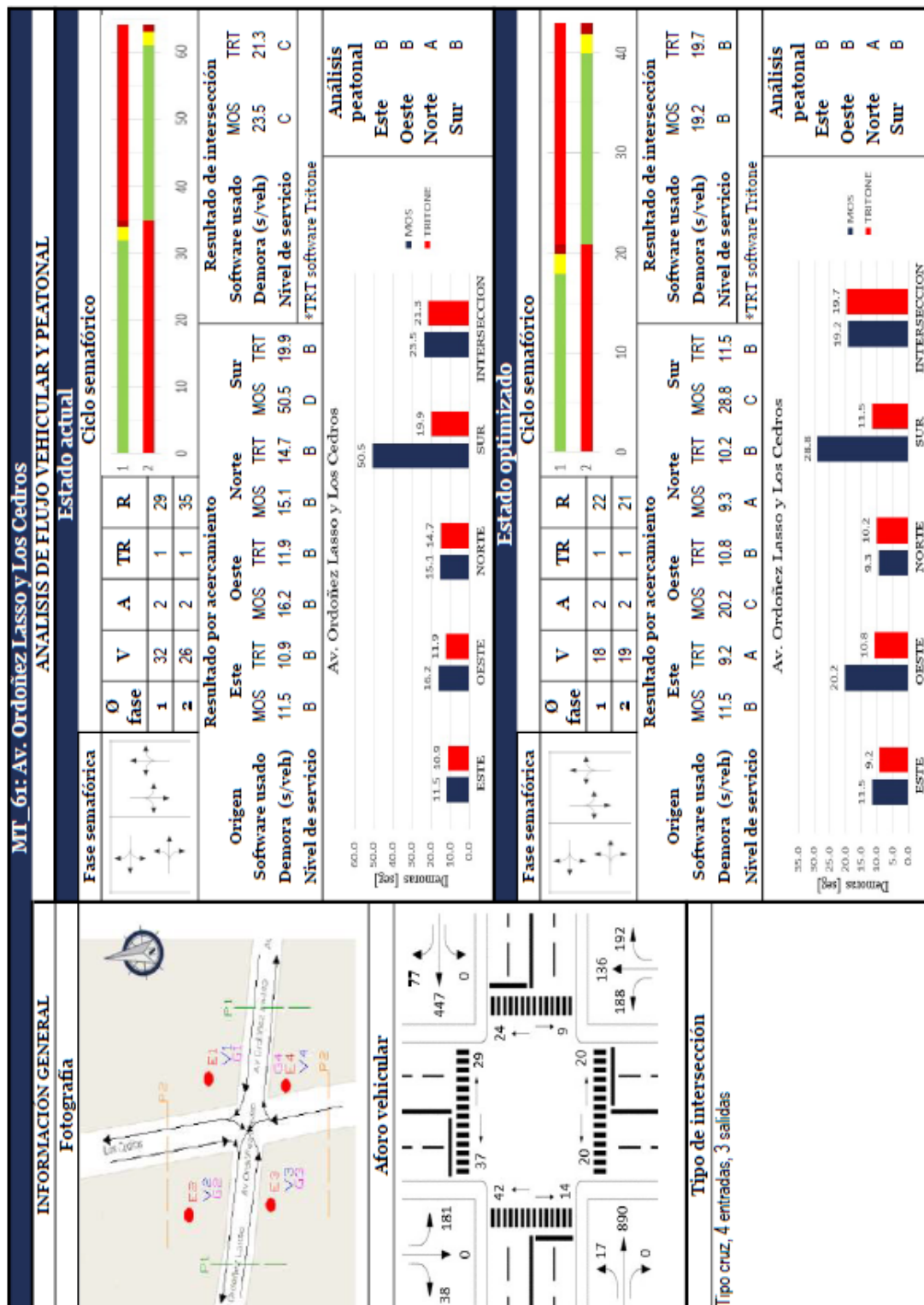
## Anexo 16



Anexo 16 Resumen MT\_56

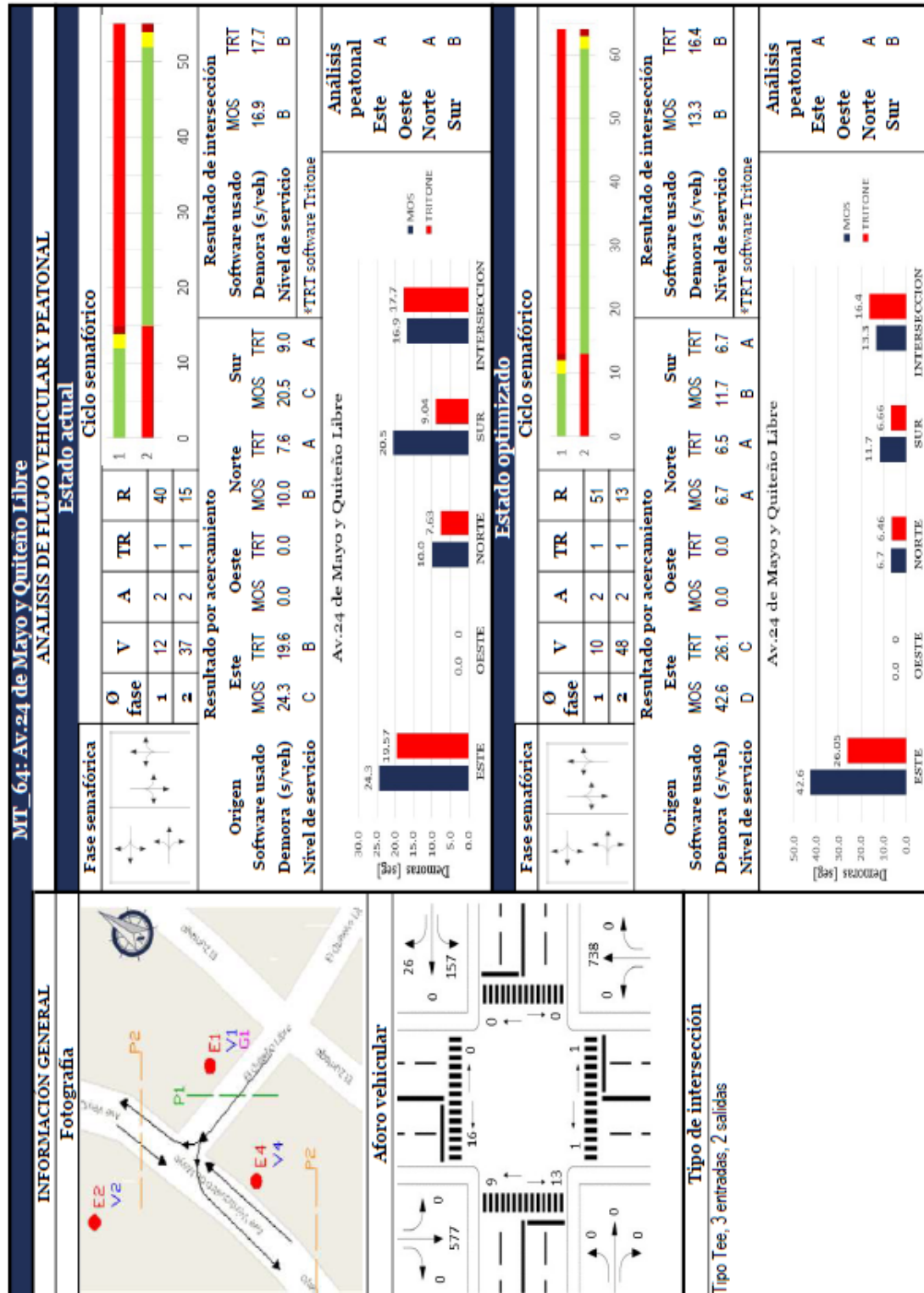


Anexo 17



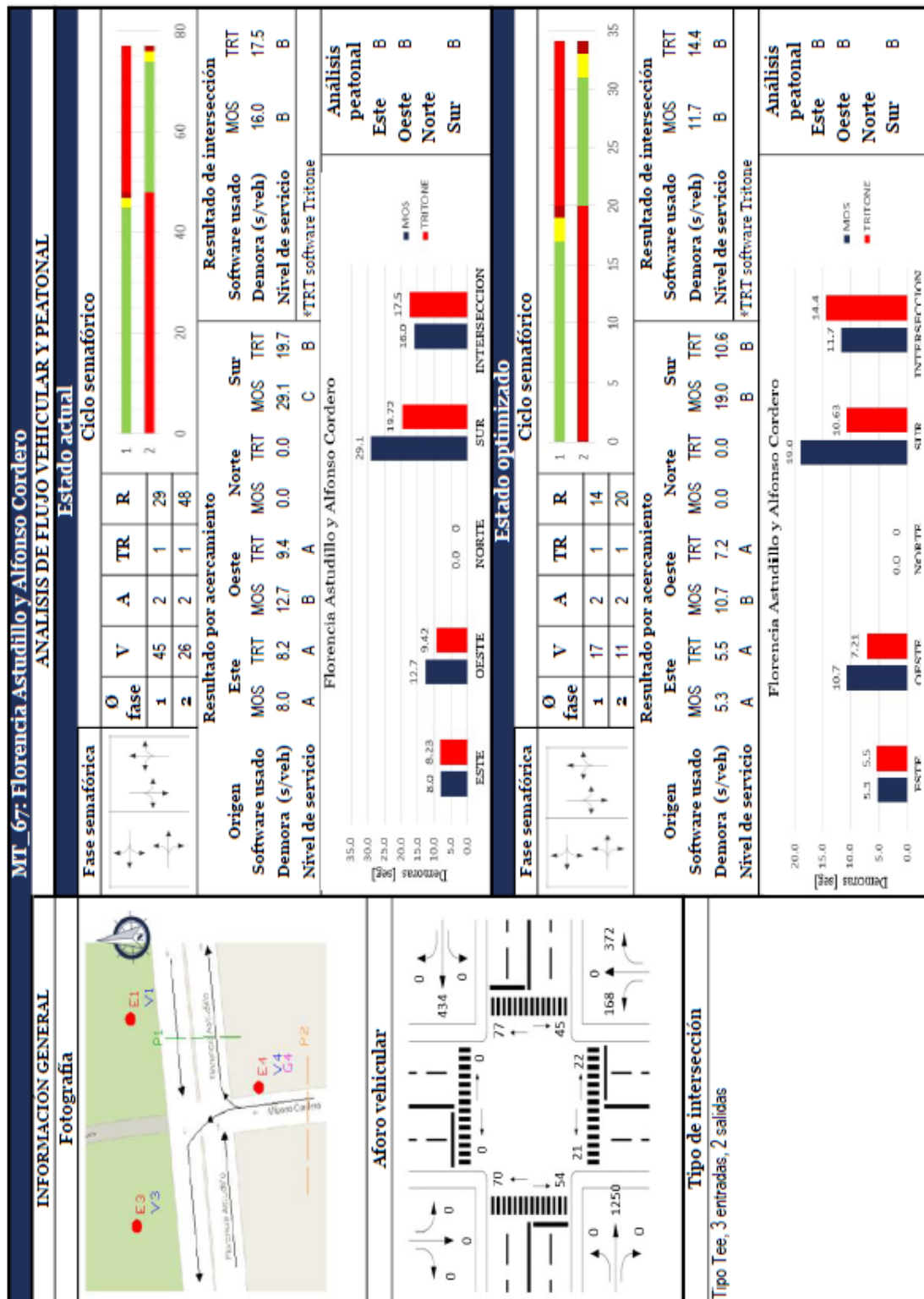
Anexo 17 Resumen MT\_61

## Anexo 18



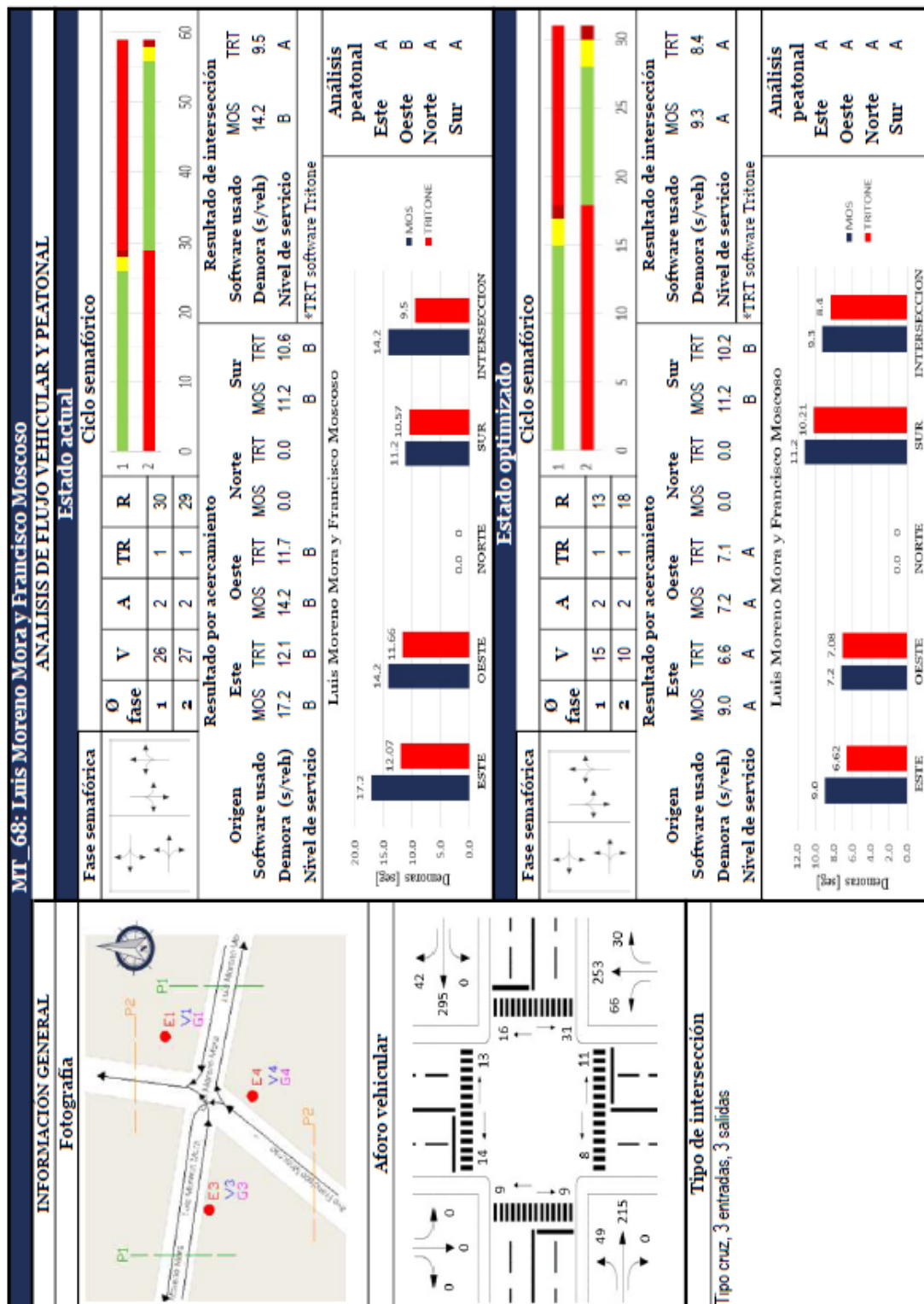
Anexo 18 Resumen MT\_64

## Anexo 19



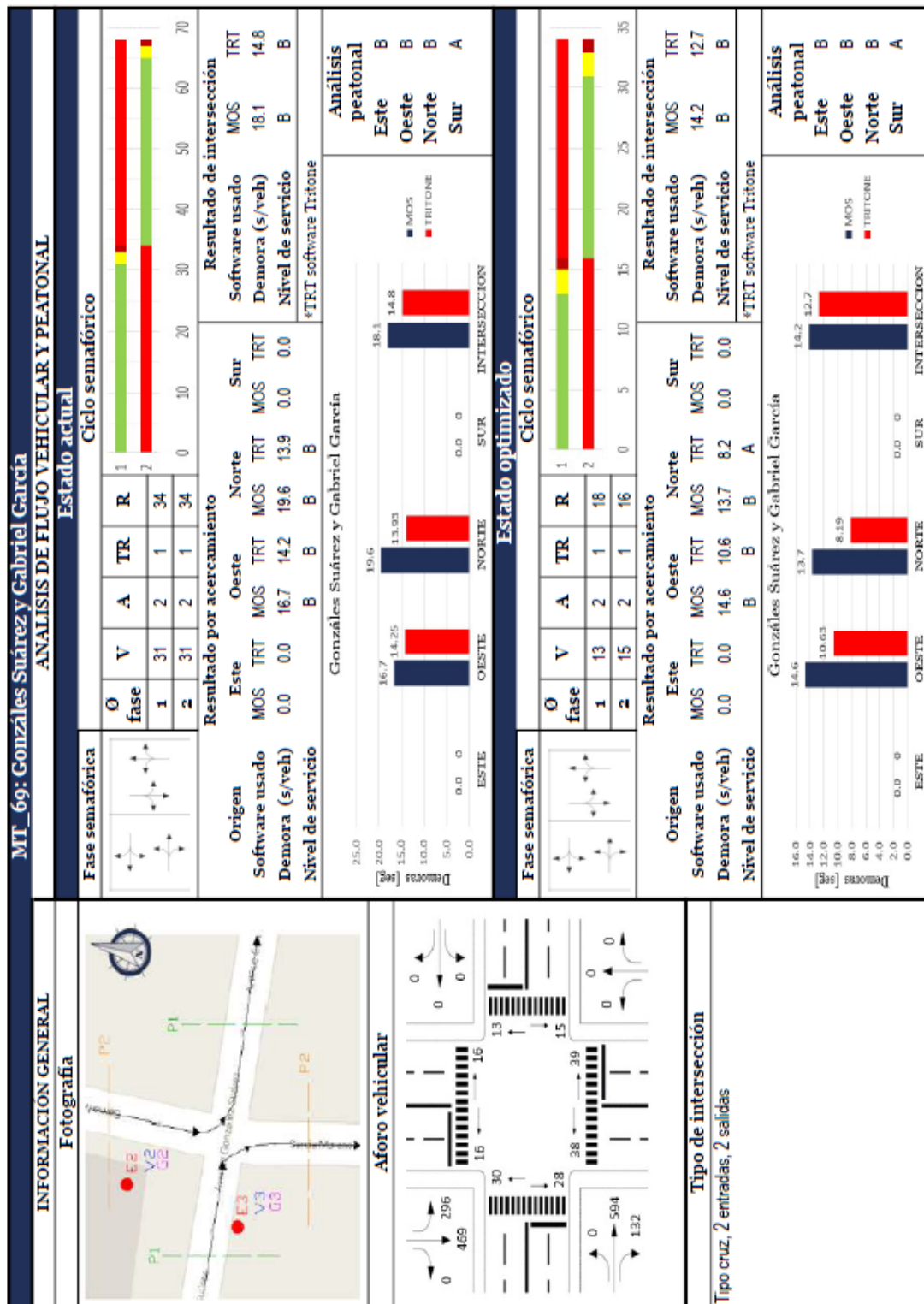
Anexo 19 Resumen MT\_67

Anexo 20



Anexo 20 Resumen MT\_68

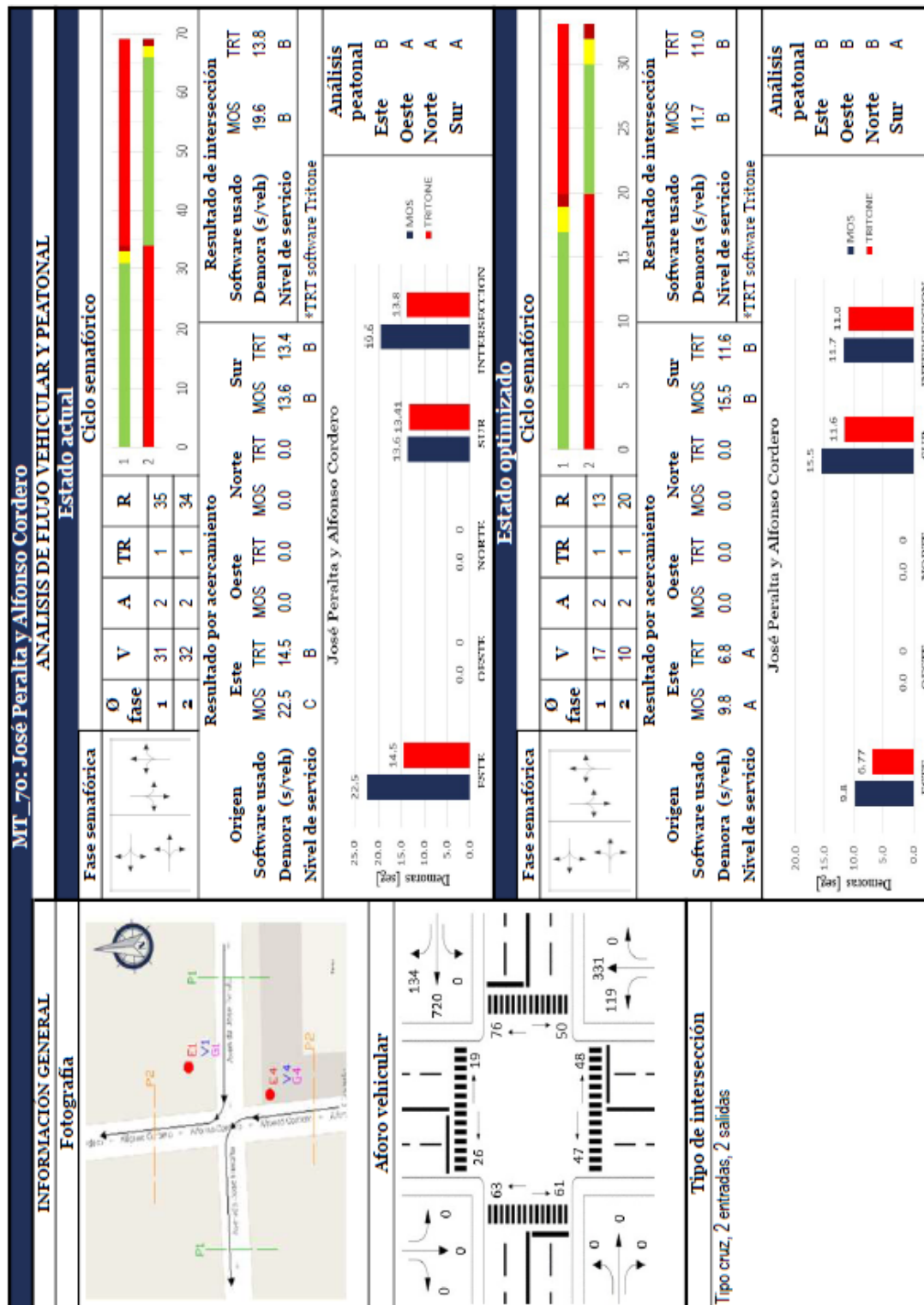
Anexo 21



Anexo 21 Resumen MT\_69

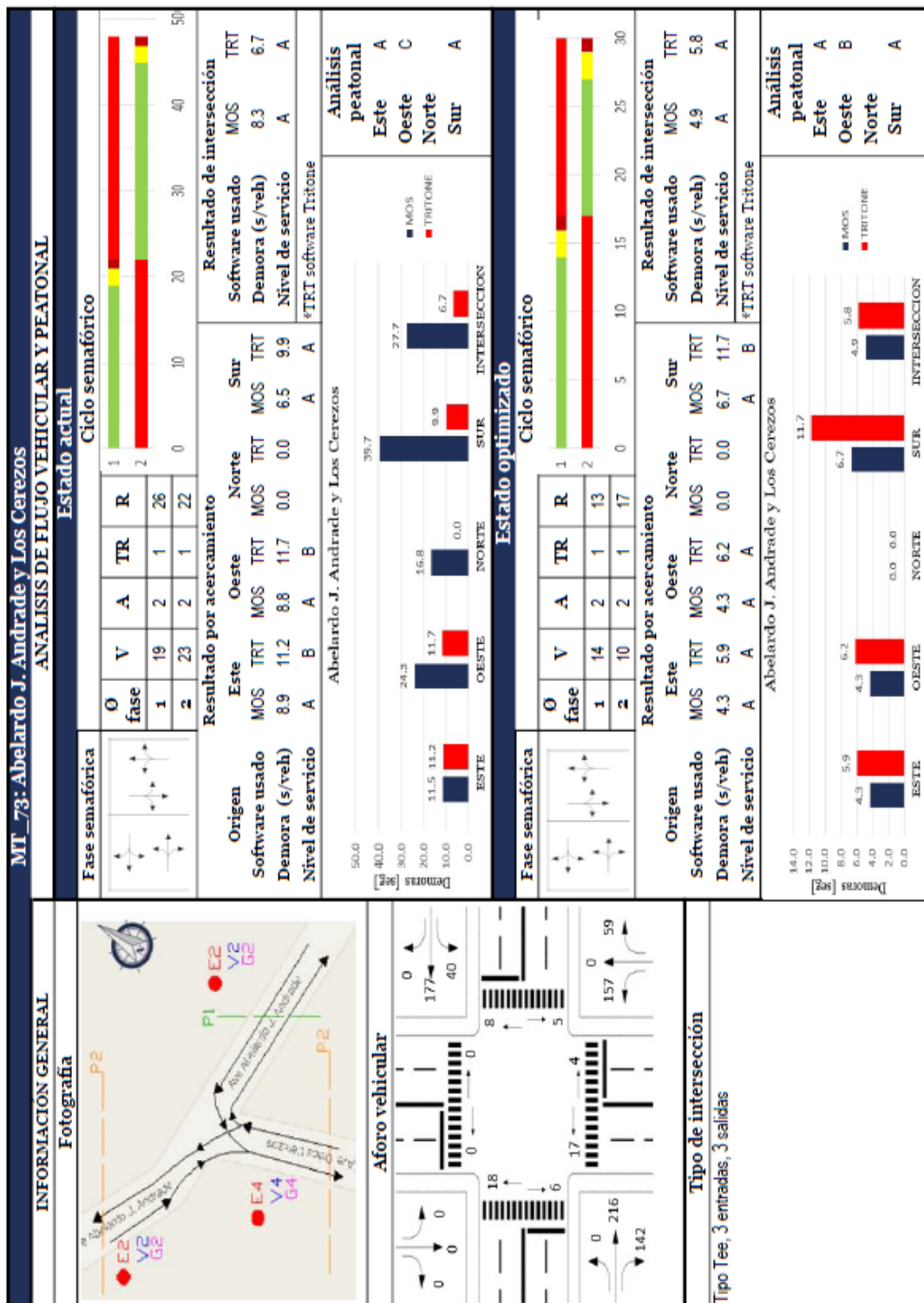


## Anexo 22



Anexo 22 Resumen MT\_70

## Anexo 23



Anexo 23 Resumen MT\_73